



## (12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 106663912 A

(43)申请公布日 2017.05.10

(21)申请号 201580040277.X

雷蒙·约翰·钱尼

(22)申请日 2015.06.01

(74)专利代理机构 北京柏杉松知识产权代理事务  
所(普通合伙) 11413

(30)优先权数据

1410003.6 2014.06.05 GB

代理人 谢攀 刘继富

(85)PCT国际申请进入国家阶段日

2017.01.24

(51)Int.Cl.

H01S 3/106(2006.01)

H01S 5/14(2006.01)

(86)PCT国际申请的申请数据

PCT/GB2015/051581 2015.06.01

(87)PCT国际申请的公布数据

W02015/185900 EN 2015.12.10

(71)申请人 瑞尼斯豪公司

地址 英国格洛斯特郡

(72)发明人 奈杰尔·约瑟夫·科伯内尔

艾伦·詹姆斯·霍洛韦

阿拉斯·雅茹尔 黄俊刚

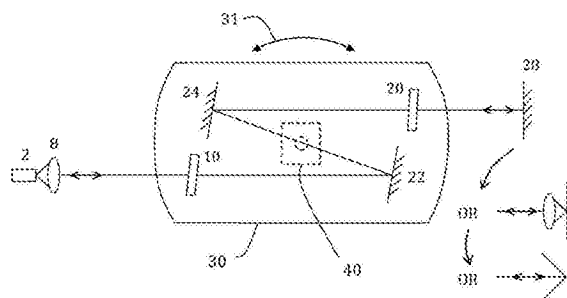
权利要求书3页 说明书18页 附图10页

(54)发明名称

激光装置

(57)摘要

一种频率可调谐激光装置包括腔模选择器(10)和腔调谐布置(22、24)。该腔模选择器(10)具有频率响应,该频率响应具有可与该激光装置的所选腔模以频率对准的选择特征。该腔调谐布置(22、24)包括以光学方式串联布置的多个反射元件,并且用于调节该激光腔的有效光学路径长度以使该腔模以频率移动。该激光装置进一步包括装置(30、40),其用于使该腔模选择器(10)和该腔调谐布置(22、24)执行同时的经协调移动,使得该选择特征和该所选腔模的相应频率以对表征该同时的经协调移动的参数大体上相同的相依性而改变。例如,具有共旋转的标准具(10)的潜望镜(22、24)可以用来提供该激光装置的无跳模调谐,尤其当该潜望镜(22、24)被配置以提供主要余弦调谐响应时。



1. 一种频率可调谐激光装置,包括界定所述激光装置能够在其处发出激光的多个腔模的激光腔,每个腔模具有不同的相应模频率,其中所述激光腔包括:

腔模选择器,其具有含有选择特征的频率响应,所述选择特征可与所述多个腔模中的一个腔模以频率对准,以激励被标示为所选腔模的所述腔模优先于其它腔模发出激光,其中可通过所述腔模选择器的预定移动来选择性地调节所述选择特征的频率;以及

腔调谐布置,其用于调节所述激光腔的有效光学路径长度以使所述腔模以频率移动,其中可通过所述腔调谐布置的预定移动来选择性地调节所述所选腔模的频率,其中所述腔调谐布置包括以光学方式串联布置的多个反射元件;

并且所述激光装置进一步包括:

致动器,其被配置为使所述腔模选择器和所述腔调谐布置执行同时的经协调移动,其中所述选择特征和所述所选腔模的相应频率因此而至少跨表征所述同时的经协调移动的参数的预定范围以对所述参数大体上相同的相依性而改变。

2. 根据权利要求1所述的激光装置,其中,所述腔模选择器的所述频率响应具有多个此类选择特征,所述选择特征中的每一个可以潜在地激励一个腔模优先于其它腔模发出激光,并且所述选择特征中的仅一个选择特征与所述所选腔模以频率对准,其中所述激光装置进一步包括具有频率响应的滤波器元件,该频率响应具有滤波器特征,该滤波器特征可与所述腔模选择器的与所述所选腔模对准的所述选择特征以频率对准,以及该频率响应与所述腔模选择器的频率响应相组合以产生激励所述所选腔模优先于其它腔模发出激光的经组合频率响应,其中所述致动器被配置为使所述滤波器元件、所述腔模选择器和所述腔调谐布置执行同时的经协调移动,其中经对准的所述选择特征、所述滤波器特征和所述所选腔模的相应频率至少跨表征所述同时的经协调移动的参数的预定范围以对所述参数大体上相同的相依性而改变。

3. 一种频率可调谐激光装置,包括界定所述激光装置能够在其处发出激光的多个腔模的激光腔,每个腔模具有不同的相应模频率,其中所述激光腔包括:

腔模选择器,其具有含有选择特征的频率响应,所述选择特征可与所述多个腔模中的一个腔模以频率对准,以激励被标示为所选腔模的所述腔模优先于其它腔模发出激光,其中可通过所述腔模选择器的预定移动来选择性地调节所述选择特征的频率;

其中,所述腔模选择器的所述频率响应具有多个这样的选择特征,所述选择特征中的每一个可以潜在地激励一个腔模优先于其它腔模发出激光,并且所述选择特征中的仅一个选择特征与所述所选腔模以频率对准,其中所述激光装置进一步包括具有频率响应的滤波器元件,所述频率响应具有滤波器特征,该滤波器特征可与所述腔模选择器的与所述所选腔模对准的所述选择特征以频率对准,以及所述频率响应与所述腔模选择器的所述频率响应相组合以产生激励所述所选腔模优先于其它腔模发出激光的经组合频率响应;

并且所述激光装置进一步包括:

致动器,其被配置为使所述腔模选择器和所述滤波器元件执行同时的经协调移动,其中经对准的所述选择特征和所述滤波器特征的相应频率因此而至少跨表征所述同时的经协调移动的参数的预定范围以对所述参数大体上相同的相依性而改变。

4. 根据权利要求2或3所述的激光装置,其中,所述滤波器元件由串联布置的多个标准具形成,其中所述多个标准具中的每个标准具具有不同的标准具模间隔。

5. 根据任一前述权利要求所述的激光装置, 其中, 执行所述同时的经协调移动的部件通过耦合件机械地耦合到彼此, 所述耦合件使得所述部件以相对于彼此的固定关系维持, 其中所述致动器被配置为使经耦合的所述部件成组一起移动。

6. 根据任一前述权利要求所述的激光装置, 其中, 所述同时的经协调移动是用于完成所述同时的经协调移动的所述部件中的每一个的相对旋转移动, 并且其中表征所述同时的经协调移动的参数是与所述相对旋转移动相关联的旋转角度。

7. 根据权利要求6所述的激光装置, 其中, 所述同时的经协调移动是用于完成所述同时的经协调移动的所述部件中的每一个的相同量的相对旋转移动。

8. 根据权利要求6或7所述的激光装置, 其中, 所述相依性是对所述旋转角度的逆余弦相依性。

9. 根据任一前述权利要求所述的激光装置, 其中, 所述腔模选择器包括衍射光栅。

10. 根据权利要求1到8中任一权利要求所述的激光装置, 其中, 所述腔模选择器包括标准具, 所述标准具具有界定多个标准具模的相对的部分反射表面, 其中所述选择特征或每个选择特征为相应标准具模或与相应标准具模相关。

11. 根据引用权利要求4的权利要求10所述的激光装置, 其中, 所述腔模选择器和所述滤波器元件共享共同的标准具。

12. 根据权利要求10或11所述的激光装置, 其中, 在所述腔调谐布置的所述反射元件之间的空间中所提供的介质具有与在所述腔模选择器标准具的所述反射表面之间的空间中所提供的介质大体上相同的折射率。

13. 根据任一前述权利要求所述的激光装置, 包括反射元件的第一布置和第二布置, 其中所述第一布置和第二布置的所述反射元件界定所述激光装置的所述激光腔, 并且所述第二布置的所述反射元件是所述腔调谐布置的所述反射元件。

14. 根据权利要求13所述的激光装置, 其中, 所述第一布置的所述反射元件被布置以界定所述激光腔的光学路径, 所述光学路径在返回到所述第一布置的同一所述反射元件之前在每个方向上至少两次通过所述腔调谐布置的串联的所述反射元件。

15. 一种频率可调谐激光装置, 包括界定所述激光装置的激光腔的反射元件的第一布置和第二布置, 所述激光腔提供所述激光装置能够在其处发出激光的多个腔模, 其中每个腔模具有不同的相应模频率, 其中所述第二布置的所述反射元件提供腔调谐布置, 所述腔调谐布置用于调节所述激光腔的有效光学路径长度以使所述腔模以频率移动, 其中所述腔调谐布置的所述反射元件以光学方式串联布置, 其中可通过所述腔调谐布置的预定移动来选择性地调节所述激光腔的所述有效光学路径长度, 并且其中所述第一布置的所述反射元件被布置以界定所述激光腔的光学路径, 所述光学路径在返回到所述第一布置的同一所述反射元件之前在每个方向上至少两次通过所述腔调谐布置的串联的所述反射元件。

16. 根据权利要求14或15所述的激光装置, 其中, 所述第一布置包括奇数个反射元件。

17. 根据权利要求13到16中任一权利要求所述的激光装置, 其中, 所述第一布置的所述反射元件中的至少一个是回射组件。

18. 根据权利要求13到17中任一权利要求所述的激光装置, 其中, 所述第一布置的所述反射元件中的至少一个是横向位移组件, 例如屋顶棱镜。

19. 根据任一前述权利要求所述的激光装置, 其中, 所述第一布置的一对反射元件之间

的间距被布置为小于所述腔调谐布置的一对反射元件之间的间距的两倍。

20. 根据任一前述权利要求所述的激光装置, 其中, 所述腔调谐布置的所述反射元件中的至少两个大体上彼此平行。

21. 根据任一前述权利要求所述的激光装置, 其中, 所述腔调谐布置包括偶数个反射元件。

## 激光装置

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种频率可控激光装置。具体来说,本发明涉及一种能够以高频率调制或线性调频的频率可控激光装置。

### 背景技术

[0002] 已知在干扰测量法等中使用的经线性调频的激光装置。具体来说,已知提供实施所谓的利特罗(Littrow)方案的激光装置,其中激光腔包含准直光被引导到其上的衍射光栅。衍射光栅的倾斜允许同时改变激光的频率和腔长,从而在没有跳模的情况下提供所需频率调谐。然而,利特罗布置具有必须使衍射光栅绕明确界定的枢轴点旋转的缺点。为提供光栅运动的必需精确性而所需要的极其稳定的机械布置因此使得难以获得高频率调制速度。

[0003] 这个问题在WO 2009/081160和WO 2010/070272中得到了解决。具体来说,WO 2009/081160描述了一种频率可调谐外腔激光装置,该激光装置包括用于产生光束的激光源、光谱调谐元件,以及用于将光束引导到光谱调谐元件上的一个或多个另外的光学组件。该激光装置的激光腔的光学组件构成部分可在第一自由度中移动,使得该可移动光学组件在第一自由度中的移动能同时改变激光腔的光学路径长度和光谱调谐元件的调谐频率,由此提供其中跳模被抑制的频率调谐。此外,有效光学路径长度和调谐频率对可移动光学组件在除第一自由度外的自由度中进行的任何移动大体上不灵敏。

[0004] 期望对频率可调谐激光装置(例如,WO 2009/081160和WO 2010/070272中描述的那些频率可调谐激光装置)提供进一步改进。

### 发明内容

[0005] 根据本发明的第一方面,提供一种频率可调谐激光装置,其包括界定激光装置能够在其处发出激光的多个腔模的激光腔。每个腔模具有不同的相应模频率。激光腔包括腔模选择器,腔模选择器具有含有选择特征的频率响应,该选择特征可与多个腔模中的一个腔模以频率对准,以激励该腔模优先于其它腔模发出激光。该腔模被标示为“所选腔模”。腔模选择器被配置为使得可通过腔模选择器的预定移动(例如,绕特定自由度的旋转)来选择性地调节选择特征的频率。激光腔还包括腔调谐布置,用于调节激光腔的有效光学路径长度以使腔模以频率移动。腔调谐布置包括以光学方式串联布置的多个反射元件。可通过腔调谐布置的预定移动来选择性地调节所选腔模的频率,该预定移动例如是绕特定自由度(例如,上文相对于腔模选择器所述的相同自由度)的旋转。激光装置进一步包括被配置为使腔模选择器和腔调谐布置执行同时的经协调移动的致动器(或包括用于使腔模选择器和腔调谐布置执行同时的经协调移动的装置),其中选择特征和所选腔模的相应频率由于同时的经协调移动而至少跨表征同时的经协调移动的参数的预定范围以对该参数大体上相同的相依性而改变。

[0006] 通过此类布置,可以跨至少预定参数范围提供激光装置的频率调谐,其中防止了

腔模之间的跳跃(即跳模)(即,实现了单模调谐)。

[0007] 本发明的实施例提供可快速调谐的窄线宽激光装置。

[0008] 腔模选择器可与腔调谐布置分离。换句话说,腔模选择器可由与腔调谐布置不同的光学组件形成。

[0009] 腔模选择器的对腔模选择器的频率响应(具有选择特征)有贡献的那些部件可以与腔调谐布置的对调节激光腔的有效光学路径长度有贡献以使腔模以频率移动的那些部件分离。

[0010] 腔模选择器的频率响应可以具有多个此类选择特征,该选择特征中的每一个可以潜在地激励一个腔模优先于其它腔模发出激光,并且该选择特征中的仅一个选择特征与所选腔模以频率对准。激光装置可以进一步包括具有频率响应的滤波器元件,该频率响应(a)具有滤波器特征,该滤波器特征可与腔模选择器的与所选腔模对准的选择特征以频率对准,以及(b)与腔模选择器的频率响应组合以产生激励所选腔模优先于其它腔模发出激光的经组合频率响应。致动器被配置为使滤波器元件、腔模选择器和腔调谐布置执行同时的经协调移动,其中经对准的选择特征、滤波器特征和所选腔模的相应频率至少跨表征同时的协调移动的参数的预定范围以对该参数大体上相同的相依性而改变。

[0011] 根据本发明的另一个方面,提供一种频率可调谐激光装置,其包括界定激光装置能够在其处发出激光的多个腔模的激光腔。每个腔模具有不同的相应模频率。激光腔包括腔模选择器,该腔模选择器具有含有选择特征的频率响应,该选择特征可与多个腔模中的一个腔模以频率对准以激励被标示为所选腔模的该腔模优先于其它腔模发出激光,可通过腔模选择器的预定移动来选择性地调节选择特征的频率。腔模选择器的频率响应具有多个此类选择特征,该选择特征中的每一个可以潜在地激励一个腔模优先于其它腔模发出激光,并且该选择特征中的仅一个选择特征与所选腔模以频率对准。激光装置可以进一步包括滤波器元件,该滤波器元件具有频率响应,该频率响应(a)具有滤波器特征,该滤波器特征可与腔模选择器的与所选腔模对准的选择特征以频率对准,以及(b)与腔模选择器的频率响应组合以产生激励所选腔模优先于其它腔模发出激光的经组合频率响应。激光装置进一步包括被配置为使腔模选择器和滤波器元件执行同时的经协调移动的致动器(或包括用于使腔模选择器和滤波器元件执行同时的经协调移动的装置),其中经对准的选择特征和滤波器特征的相应频率因此而至少跨表征同时的经协调移动的参数的预定范围以对该参数大体上相同的相依性而改变。

[0012] 滤波器元件可由串联布置的多个标准具形成,其中多个标准具中的每个标准具具有不同的标准具模间隔。

[0013] 执行同时的协调移动的部件可通过耦合件机械地耦合到彼此,该耦合件将该部件以相对于彼此的固定关系维持,其中该致动器被配置为使经耦合的部件成组一起移动。

[0014] 同时的经协调移动可以是执行同时的经协调移动的部件中的每一个的相对旋转移动。表征同时的经协调移动的参数是与相对旋转移动相关联的旋转角度。

[0015] 同时的经协调移动可以是执行同时的经协调移动的部件中的每一个的相同量的相对旋转移动。

[0016] 相依性可以是对旋转角度的逆余弦相依性。

[0017] 腔模选择器可以包括衍射光栅。

[0018] 腔模选择器可以包括标准具,该标准具具有界定多个标准具模的相对的部分反射表面,其中该选择特征或每个选择特征为相应标准具模或与相应标准具模相关。

[0019] 腔模选择器和滤波器元件可以共享共同的标准具。

[0020] 在腔调谐布置的反射元件之间的空间中所提供的介质可以具有与在腔模选择器标准具的反射表面之间的空间中所提供的介质大体上相同的折射率。

[0021] 激光装置可以包括反射元件的第一布置和第二布置,其中第一布置和第二布置的反射元件界定激光装置的激光腔,并且第二布置的反射元件是腔调谐布置的反射元件。

[0022] 第一布置的反射元件可被布置以界定激光腔的光学路径,该光学路径在返回到第一布置的同一反射元件之前在每个方向上至少两次通过腔调谐布置的串联的反射元件。

[0023] 腔调谐布置可以包括偶数个反射元件。

[0024] 以光学方式串联布置的腔调谐布置的多个反射元件可以被视为串联中的每个反射元件被布置以引导光朝向串联中的下一个反射元件(如果有下一个反射元件的话)。

[0025] 腔调谐布置可以由材料衬底形成,其中腔调谐布置的反射元件形成于该材料衬底的表面上或由该表面形成。

[0026] 激光装置可以是外腔激光装置,该激光装置的激光腔是外部激光腔。

[0027] 腔调谐布置的预定移动可以是腔调谐布置作为整体的移动,即,使得腔调谐布置的所有反射元件成组或单元一起移动。

[0028] 根据本发明的另一个方面,提供一种频率可调谐激光装置,其包括反射元件的第一布置和第二布置的。第一布置和第二布置的反射元件界定激光装置的激光腔。激光腔提供激光装置能够在其处发出激光的多个腔模。每个腔模具有不同的相应模频率。第二布置的反射元件提供腔调谐布置,该腔调谐布置用于调节激光腔的有效光学路径长度以使腔模以频率移动。腔调谐布置的反射元件以光学方式串联布置。可通过腔调谐布置的预定移动(例如,绕特定自由度的旋转)来选择性地调节激光腔的有效光学路径长度。第一布置的反射元件被布置以界定激光腔的光学路径,该光学路径在返回到第一布置的同一反射元件之前在每个方向上至少两次通过腔调谐布置的串联的反射元件。

[0029] 这至少相对于执行激光腔的端面反射器功能的第一布置的反射元件适用,例如与激光源相关联的反射元件。

[0030] 第一布置的反射元件可被布置以界定在返回到第一布置的同一反射元件之前在每个方向上至少偶数次通过腔调谐布置的串联的反射元件的激光腔的光学路径。

[0031] 第一布置可以包括奇数个反射元件。

[0032] 第一布置的反射元件中的至少一个可以是回射组件。

[0033] 第一布置的反射元件中的至少一个是横向位移组件,例如屋顶棱镜。

[0034] 第一布置的一对反射元件之间的间距可被布置为小于腔调谐布置的一对反射元件之间的间距的两倍,更优选地小于腔调谐布置的该对反射元件之间的间距,更优选地小于腔调谐布置的该对反射元件之间的间距的一半,更优选地小于腔调谐布置的该对反射元件之间的间距的四分之一,更优选地小于腔调谐布置的该对反射元件之间的间距的十分之一。

[0035] 第一布置的该对反射元件可以构成激光装置的端面镜面。

[0036] 腔调谐布置的反射元件中的至少两个可以基本上彼此平行。

[0037] 腔调谐布置可以包括偶数个反射元件。

[0038] 根据本发明的另一个方面,提供一种光学装置,其包括反射元件的第一布置和第二布置。第一布置和第二布置的反射元件界定光学装置的光学腔(或光学谐振器或谐振器腔)。光学腔提供多个腔模(或谐振器模或谐振模),其中每个腔模具有不同的相应模频率。第二布置的反射元件提供腔调谐布置,该腔调谐布置用于调节光学腔的有效光学路径长度以使腔模以频率移动。腔调谐布置的反射元件以光学方式串联布置。可通过腔调谐布置的预定移动(例如,绕特定自由度的旋转)来选择性地调节光学腔的有效光学路径长度。第一布置的反射元件被布置以界定光学腔的光学路径,该光学路径在返回到第一布置的同一反射元件之前在每个方向上至少两次通过腔调谐布置的串联的反射元件。第一布置的反射元件中的至少一个可以是或包括回射反射器。

[0039] 根据本发明的另一个方面,提供一种激光装置,其包括由串联布置的多个标准具形成的滤波器,其中多个标准具中的每个标准具具有不同的标准具模间隔。多个标准具中的标准具优选地是无源标准具。

[0040] 根据本发明的另一个方面,提供一种外腔激光装置,其包括界定该激光装置的激光腔的反射元件布置,激光腔提供激光装置能够在其处发出激光的多个腔模,其中每个腔模具有不同的相应模频率,其中反射元件中的至少一个是回射组件。

[0041] 根据本发明的另一个方面,提供一种外腔激光装置,其包括界定该激光装置的激光腔的反射元件布置,激光腔提供激光装置能够在其处发出激光的多个腔模,其中每个腔模具有不同的相应模频率,其中反射元件中的至少一个是横向位移组件,例如屋顶棱镜。

[0042] 根据本发明的方面,提供一种频率可调谐激光装置,其包括腔模选择器和腔调谐布置。腔模选择器具有频率响应,该频率响应具有可与激光装置的所选腔模以频率对准的选择特征。腔调谐布置包括以光学方式串联布置的多个反射元件,并用于调节激光腔的有效光学路径长度以使腔模以频率移动。该激光装置进一步包括用于使腔模选择器和腔调谐布置执行同时的经协调移动的装置,使得选择特征和所选腔模的相应频率以对表征同时的经协调移动的参数大体上相同的相依性而改变。例如,可以使用具有共旋转的标准具的潜望镜来提供激光装置的无跳模的调谐,尤其当该潜望镜被配置以提供主要余弦调谐响应时。

[0043] 根据本发明的方面,提供一种频率可调谐激光装置,其包括腔模选择器和滤波器元件。腔模选择器具有频率响应,该频率响应具有多个选择特征,其中的一个与激光装置的所选腔模以频率对准。滤波器元件具有频率响应,该频率响应(a)具有滤波器特征,该滤波器特征可与腔模选择器的与所选腔模对准的选择特征以频率对准,以及(b)与腔模选择器的频率响应组合以产生激励所选腔模优先于其它腔模发出激光的经组合频率响应。该激光装置进一步包括用于使腔模选择器和滤波器元件执行同时的经协调移动的装置,使得经对准的选择特征和滤波器特征的相应频率以对表征同时的经协调移动的参数大体上相同的相依性而改变。例如,可以使用共旋转的滤波器和标准具来增强激光装置的无跳模的调谐。

[0044] 根据本发明的方面,提供一种光学装置,该光学装置包括界定该光学装置的光学腔的反射元件的第一布置和第二布置,其中该光学腔提供多个腔模。以光学方式串联布置的第二布置的反射元件提供腔调谐布置,该腔调谐布置用于调节光学腔的有效光学路径长度以使腔模以频率移动。可通过腔调谐布置的预定移动来选择性地调节光学腔的有效光学



路径长度。第一布置的反射元件被布置以界定光学腔的光学路径,该光学路径在返回到第一布置的同一反射元件之前在每个方向上至少两次通过腔调谐布置的串联的反射元件。该光学装置可以是频率可调谐激光装置,其中光学腔是该激光装置的激光腔。例如,可以使用双通作为手段以稳定端面镜面角偏移。

[0045] 根据本发明的方面,提供一种激光装置,其包括由串联布置的多个标准具构成的滤波器,其中多个标准具中的每个标准具具有不同的相应标准具模间隔。例如,成对或成组的标准具可以用作用于标准具侧模抑制的多层滤波器的替代方案。

[0046] 根据本发明的方面,提供一种外腔激光装置,其包括界定该激光装置的激光腔的反射元件布置,其中反射元件中的至少一个是回射或横向位移组件。

[0047] 根据本发明的方面,提供一种机制(例如从光学组件反射和/或传输),该机制用于监测发出激光的腔模与腔模选择器的选择特征的对准并将此监测与调节机制结合以维持它们的相对对准。调节机制可以是二极管驱动电流,和/或二极管温度,和/或腔中的至少一个元件的温度,和/或腔中的各种调谐部件/光学元件的旋转/平移。

[0048] 应注意,根据如上文所定义的本发明的任何方面编写的补充说明适当时同等地适用于本发明的其它方面。

## 附图说明

[0049] 现将借助于实例参考附图,在附图中:

[0050] 图1是适用于解释本发明的实施例的激光装置的示意图;

[0051] 图2是与图1的激光装置相关联的多个离散激光腔模的示意性图示;

[0052] 图3是在本发明的实施例中用作腔模选择器的标准具的示意性图示,具有用于推导标准具的标准具模的标注;

[0053] 图4是与图2的激光腔模组合的图3的腔模选择器的多个模(选择特征)的示意性图示;

[0054] 图5是滤波器(和/或增益介质的吸收带)对图4的组合的标准具模和腔模响应的作用的示意性图示;

[0055] 图6是在本发明的实施例中用作腔调谐布置的潜望镜布置的示意性图示;

[0056] 图7是图6的替代型式,具有用于推导腔调谐布置的调谐响应的额外标注;

[0057] 图8是图6的另一替代型式,具有用于推导腔调谐布置的调谐响应的额外标注;

[0058] 图9是玻璃板的示意性表示,具有用于推导旋转的标准具的腔调谐作用的额外标注;

[0059] 图10A和10B示出了图6中示出的潜望镜或腔调谐布置的替代方案;

[0060] 图11示意性地示出了图6中示出的方案的一个实际布置,包含对图6的端面反射器的可能改进;

[0061] 图12是图11的布置的有利修改的示意性图示;

[0062] 图13是图12的变化形式,示出了使用横向位移组件的作用;

[0063] 图14示出了宽带滤波器元件的替代方案,其中与模选择标准具组合使用额外标准具;

[0064] 图15是根据本发明的实施例的激光装置的一般化示意性图示;以及

[0065] 图16示出了图11中示出的潜望镜布置的多个替代方案。

## 具体实施方式

[0066] 在详细描述本发明的实施例之前,将首先参考图1研究可调谐窄线宽激光装置相关的背景技术和理论。

[0067] 图1示出了可调谐外腔激光装置1,该激光装置包括光学增益介质2(例如,由半导体二极管形成),该光学增益介质具有含抗反射涂层的正面4和含反射涂层的背面6。布置在光学增益介质2正面的耦合透镜8使光被耦合进和离开光学增益介质2。在其正面14上具有部分反射涂层的透光光学元件12被布置成构成谐振外激光腔5,其中该激光腔5的腔长由光学增益介质2的背面6与光学元件12的正面14之间的距离 $L_c$ 界定。由于光学元件12的正面14上的涂层是部分透射的,因此来自激光腔5的一些光穿过光学元件12以形成来自激光装置1的输出16。

[0068] 当然,可能有其它外腔激光装置布置。例如,通过在光学增益介质2的背面6上具有部分反射涂层以及在光学元件12的正面14上具有完全反射涂层,可以替代地从光学增益介质2的背面获得来自激光装置1的输出16。替代地,通过包含光束分光器组件(未示出)可从激光装置1引出光。所属领域的技术人员将易于清楚其它布置。

[0069] 激光装置1还包括呈标准具10形式的光谱调谐元件,以及滤波器20,该滤波器布置在激光腔5内的激光的光学路径中。标准具10和滤波器20的作用将在下文更详细地描述。还如下文所阐述的,标准具10在本文中也称为腔模选择器。

[0070] 现在忽略标准具10和滤波器20的作用,激光腔5产生如图2中示意性示出的多个离散腔模,每个腔模具有不同频率(以不同频率为中心)。腔模由腔长度内的完整回合的光学路径长度 $2n_c L_c$ 来界定,其等于真空波长的整数倍:

$$[0071] \quad 2n_c L_c = m_c \lambda_0$$

[0072] 其中:

[0073]  $L_c$ 是腔长度

[0074]  $\lambda_0$ 是真空中波长

[0075]  $n_c$ 是腔中的光学折射率

[0076]  $m_c$ 是一个整数

[0077] 以上表达式可视为激光腔的连续传递之间的光学路径差 $\Delta$ ,并可通过使用以下表达式关于真空频率 $\nu_0$ 而不是真空波长 $\lambda_0$ 来写出:

$$[0078] \quad c = \lambda_0 \nu_0$$

$$[0079] \quad \lambda_0 = \frac{c}{\nu_0} = \frac{c}{\nu_c}$$

[0080] 其中 $c$ 是真空中光速,且 $\nu_c$ 是腔模频率(其与真空频率 $\nu_0$ 相同)。

[0081] 这得出:

$$[0082] \quad 2n_c L_c = m_c \frac{c}{\nu_c}$$

[0083] 可以重新整理以上表达式以提供关于腔模频率 $\nu_c$ 的表达式:

$$[0084] \quad v_c = m_c \frac{c}{2n_c l_c}$$

[0085] 因此相邻腔模之间的频率间隔为:

$$[0086] \quad \frac{c}{2n_c l_c}$$

[0087] 此频率间隔在图2上进行了标记。图2中示出的离散腔模界定了激光装置的可能操作频率,因为激光仅能以那些离散频率发出激光。为了确保单模操作,有必要使那些腔模中的仅一个腔模优先。

[0088] 使单个腔模优先的一种方法是在激光腔5中包含标准具10。如图3中所示,标准具10由彼此大体上平行的具有垂直间距 $t_e$ 的两个部分反射表面17、19构成。光线11相对于表面法线成角度 $\alpha$ 入射在标准具10上,而标准具10内的光学路径相对于表面法线成角度 $\beta_e$ 。

[0089] 参考图3上标记的点A、B、D、E和F,通过以下表达式给出标准具10的连续传递之间的光学路径差 $\Delta$  (即光线13与15之间的光学路径差):

$$[0090] \quad \Delta = (BD+DE) n_e - (BF) n_c$$

$$[0091] \quad = 2 (DE) n_e - (BF) n_c$$

[0092] 其中 $n_e$ 是标准具10中的光学折射率。

[0093] 根据基本三角学可知:

$$[0094] \quad BF = BE \sin \alpha$$

[0095] 并且还可知:

$$[0096] \quad BE = 2 DE \sin \beta_e$$

[0097] 因此:

$$[0098] \quad BF = 2 DE \sin \beta_e \sin \alpha$$

[0099] 将此表达式代入关于 $\Delta$ 的表达式中,获得以下:

$$[0100] \quad \Delta = 2DE (n_e - n_c \sin \beta_e \sin \alpha)$$

[0101] 同样,根据基本三角学可知:

$$[0102] \quad DE = \frac{t_e}{\cos \beta_e}$$

[0103] 根据斯涅尔定律还可知:

$$[0104] \quad \sin \alpha = \frac{n_e}{n_c} \sin \beta_e$$

[0105] 这因此得出:

$$\Delta = 2 \frac{t_e}{\cos \beta_e} (n_e - n_c \sin^2 \beta_e)$$

$$[0106] \quad = \frac{2n_e t_e}{\cos \beta_e} (1 - \sin^2 \beta_e) \\ = 2n_e t_e \cos \beta_e$$

[0107] 标准具模由等于整数真空波长的标准具10的连续传递之间的光学路径差 $\Delta$ 来界定 (与上文腔模的界定类似):

$$[0108] \quad 2n_e t_e \cos \beta_e = m_e \lambda_0$$

[0109] 其中：

[0110]  $m_e$ 是整数

[0111]  $\lambda_0$ 是真空中波长

[0112] 同样，以上表达式可通过使用以下表达式关于频率 $\nu_0$ 而不是波长 $\lambda_0$ 来写出：

[0113]  $c = \lambda_0 \nu_0 = \lambda_e \nu_e$

[0114] 其中 $\nu_e$ 是标准具模频率（其与真空频率 $\nu_0$ 相同）。

[0115] 这得出关于标准具模频率 $\nu_e$ 的以下表达式：

$$[0116] \quad \nu_e = m_e \frac{c}{2n_e t_e \cos \beta_e}$$

[0117] 比较此表达式与上文推导出的关于腔模频率 $\nu_c$ 的表达式：

$$[0118] \quad \nu_c = m_c \frac{c}{2n_c L_c}$$

[0119] 可以通过考虑“标准具长度” $L_e$ 将标准具表达式置于类似形式，该 $L_e$ 不固定而是根据以下表达式变化：

[0120]  $L_e = t_e \cos \beta_e$

[0121] 因此：

$$[0122] \quad \nu_e = m_e \frac{c}{2n_e L_e}$$

[0123] 通过使得 $L_e \ll L_c$ ，标准具模间距变得比腔模间距大得多，并且出现经组合的腔和标准具增益，如图4中示意性地示出。

[0124] 如图4中所示，标准具增益（或频率响应）有效地叠加腔增益上，使得标准具增益以周期方式起作用从而根据标准具增益函数的包络来抑制腔模。由于图4中标记为‘0’的腔模与标准具模增益中的峰值最佳地对准（其它标准具模峰值与腔模略微偏移），因此由于该腔模具有最大增益而激励该腔模优先于其它腔模发出激光。

[0125] 因此，理论上，根据图4的激光设置将以腔模‘0’的频率运行单模。标准具10起作用以挑选或选择特定腔模用作主模。换句话说，标准具10执行腔模选择器的功能，该腔模选择器具有频率响应，该频率响应具有可与多个腔模的特定腔模（腔模‘0’）以频率对准以激励该腔模优先于其它腔模发出激光的选择特征（标准具模‘k’）而且该选择特征（标准具模‘k’）的频率可通过标准具10的旋转而选择性地调节。

[0126] 然而，从图4可见，与标准具模‘k’（其环绕腔模‘0’）相邻的标准具模具有非常接近标准具模增益峰值的腔模。因此可以理解，主要激光模将对标准具长度和腔长度中的一个或两个的轻微变动非常敏感，这会导致不期望的模跳跃。在这方面，模跳跃是当激光在腔模之间跳变或‘跳跃’时，因此输出光也在不同频率之间不当地跳跃。

[0127] 因此，由于无法理想地保证标准具模相对于腔模的位置，所以除标准具10以外还可以使用（单峰）滤波器以提供标准具模中除一个以外其余所有的标准具模的更确定的抑制。

[0128] 图5中示意性地示出了对于具有安装到位的宽带滤波器20的激光装置1的净腔增益，其中滤波器峰与腔模‘0’对准。通过由宽带滤波器20提供的额外抑制，激光装置1现将以腔模‘0’的频率更可靠地运行单模，即使标准具10或滤波器20的增益（尤其是滤波器20的增

益)存在轻微错位。(激光介质的自然增益分布的确还实际上用作自然宽带滤波器,且这在一些应用中可能足以。)

[0129] 如果可以使腔模‘0’和标准具模‘k’以经充分同步的方式沿着频率轴 $\nu$ 移动,那么激光装置1也是单模可调谐的(即,可在不跳跃到另一模的情况下调谐)。在此上下文中,“经充分同步”可以理解为在腔模与标准具模之间引入(归因于调谐)的频率差,其小于腔模间隔的一半或相较于腔模间隔的一半为小,即:

$$[0130] \quad \frac{1}{2} \frac{c}{2n_c L_c}$$

[0131] 对于小于正或负标准具模间隔的一半的调谐范围,即小于:

$$[0132] \quad \pm \frac{1}{2} \frac{c}{2n_e L_e}$$

[0133] 宽带滤波器20可以是稳定的。对于较宽的调谐范围,滤波器峰也应与标准具模运动充分地同步。在此意义上的充分地同步可以理解为滤波器峰与标准具模之间引入(归因于调谐)频率差,其小于标准具模间隔的一半或相较于标准具模间隔的一半为小,即:

$$[0134] \quad \frac{1}{2} \frac{c}{2n_e L_e}$$

[0135] 从关于图3的以上论述,可以清楚地是,通过改变入射角 $\alpha$ (以及由此改变内角 $\beta_e$ )可以使标准具模沿着频率轴移动。上文推导了关于标准具模频率 $\nu_e$ 的表达式,复制如下:

$$[0136] \quad \nu_e = m_e \frac{c}{2n_e t_e \cos \beta_e}$$

[0137] 现在,已知宽带多层滤波器的峰值频率 $\nu_f$ 沿着频率轴移动大致为:

$$[0138] \quad \nu_f \propto \frac{1}{\cos \beta_f}$$

[0139] 其中 $\beta_f$ 是滤波器20内的有效光学路径角。

[0140] 基于以上精确的分析,本申请人已了解,归因于标准具模频率和滤波器峰两者对光学路径角 $\beta$ 的逆余弦相依性,将通过标准具10的旋转以及宽带滤波器20与标准具10的共旋转来实现可调谐激光装置的有效调谐布置。需强调的是,本文中对“逆余弦相依性”的引用是对乘法逆元素(即余弦的互逆)而不是函数逆元素(即,反余弦)的引用。

[0141] 本申请人还已经从上文的分析中了解,为了确保腔模也与标准具模和滤波器峰同步地移动,理想的是要求使腔模也以与标准具10和滤波器20相同的逆余弦旋转相依性来一定程度地改变。

[0142] 本申请人提出可以通过图6中示出的布置实现这一点,其中通过布置在第一固定端面镜面26与第二固定端面镜面28之间的可旋转单元30承载标准具10和滤波器20,第二固定端面镜面28布置成大体上平行于第一固定端面镜面26。

[0143] 如下文将进一步看到的,外部镜面26和28分别对应于图1中示出的激光装置1的反射表面6和14。然而,腔长度在图6写成 $t_c$ 而不是 $L_c$ ,因为 $t_c$ 是固定距离,而有效激光腔长度 $L_c$ 将取决于可旋转单元30的旋转角度而变化;这将在下文明显可见。

[0144] 可旋转单元30还承载以“潜望镜”布置朝向彼此布置的第一内部镜面22和第二内部镜面24(镜面22和24相对于可旋转单元30为“内部”的,与相对于可旋转单元30为“外部”

的镜面26和28区分开来)。第一镜面22和第二镜面24由此耦合在一起并且具有相对于彼此的固定位置,向内朝向大体上彼此平行的反射表面。可旋转单元30(以及由此第一镜面22和第二镜面24以及标准具10和滤波器20)可在由箭头31示出的方向上旋转。

[0145] 通过此类布置,以及通过恰当地定位的可旋转单元30,来自第一外部镜面26的光通过第一内部镜面22朝向第二内部镜面24反射,第二内部镜面24继而使该光朝向第二外部镜面28反射。光垂直于第一外部镜面26和第二外部镜面28入射。由于可旋转单元30中的镜面22、24的潜望镜布置,可旋转单元30可以被称为“潜望镜”单元。

[0146] 可以考虑激光装置1具有反射元件的第一和第二不同布置。第一外部镜面26和第二外部镜面28组成反射元件的第一布置,而第一内部镜面22和第二内部镜面24组成反射元件的第二布置(对应于潜望镜单元30)。第一和第二布置的反射元件一起界定激光装置1的激光腔。第二布置的反射元件以光学方式串联布置,从而形成潜望镜类布置,并且(如下文将更详细阐述)提供用于调节激光腔的有效光学路径长度的腔调谐布置。

[0147] 穿过可旋转潜望镜单元30的光学路径具有图7中示出的形式。为简单起见,可旋转潜望镜单元30在图7中示出为具有等于第一内部镜面22与第二内部镜面24之间的间距 $t_p$ 的范围,其中该单元30用具有折射率 $n_p$ 的介质填充。在单元30外部的激光腔5中,存在具有折射率 $n_c$ 的介质。这种简化仅仅是为了解释的目的,其中分析是针对在第一内部镜面22的平面与第二内部镜面24的平面之间具有潜望镜材料的潜望镜单元30(例如,其中潜望镜单元30由具有反射区域以形成镜面22、24的单一件透明材料制成)。所属领域的技术人员将易于推导出针对替代布置的分析,其中潜望镜材料的范围不与第一内部镜面22的平面和第二内部镜面24的平面重合而是简单延伸,并且该布置不影响本发明的基本原理。如下文将看到的,在一个实施方案中,潜望镜单元30至少用空气填充,因此在单元30内部和外部两者的材料相同( $n_p = n_c$ )。

[0148] 出于推导穿过可旋转潜望镜单元30的光学路径长度的目的,重新呈现图7作为图8,其中包含一些额外标注。参考图8,穿过可旋转潜望镜单元30的光学路径长度可以写成该单元30外部的的光学路径长度和该单元30内部的光学路径长度的总和:

[0149] 路径 $= n_c (t_c - (AC + BF)) + n_p (AB + BD + DE)$

[0150] 由于 $AB = BD = DE$ ,所以上式可以表达为:

[0151] 路径 $= n_c t_c - n_c (AC + BF) + 3n_p (AB)$

[0152] 根据基本三角学和光学可知:

[0153]  $BF = BE \sin \alpha$

[0154]  $BE = 2DE \sin \beta_p$

[0155]  $DE = AB$

[0156]  $\sin \alpha = \frac{n_p}{n_c} \sin \beta_p$  (斯涅尔定律)

[0157] 因此:

[0158]  $BF = 2AB \frac{n_p}{n_c} \sin^2 \beta_p$

[0159] 可以推导出针对AC的表达式如下:

$$\begin{aligned}
 AC &= AB \cos(\alpha - \beta_p) \\
 [0160] \quad &= AB(\cos \alpha \cos \beta_p + \sin \alpha \sin \beta_p) \\
 &= AB \left( \cos \alpha \cos \beta_p + \frac{n_p}{n_c} \sin^2 \beta_p \right) \quad (\text{使用斯涅尔定律})
 \end{aligned}$$

[0161] 因此:

$$[0162] \quad n_c(AC+BF) = AB(n_c \cos \alpha \cos \beta_p + 3n_p \sin^2 \beta_p)$$

[0163] 将此式放入光学路径的表达式中, 得出:

$$[0164] \quad \text{路径} = n_c t_c - AB(n_c \cos \alpha \cos \beta_p + 3n_p \sin^2 \beta_p) + 3n_p(AB)$$

$$[0165] \quad = n_c t_c - AB(n_c \cos \alpha \cos \beta_p + 3n_p(1 - \cos^2 \beta_p) - 3n_p)$$

$$[0166] \quad = n_c t_c - AB(n_c \cos \alpha \cos \beta_p - 3n_p \cos^2 \beta_p)$$

[0167] 根据基本三角学可知:

$$[0168] \quad AB = \frac{t_p}{\cos \beta_p}$$

[0169] 因此, 穿过可旋转潜望镜单元30的光学路径的表达式变为:

$$\begin{aligned}
 [0170] \quad \text{路径} &= n_c t_c - \frac{t_p}{\cos \beta_p} (n_c \cos \alpha \cos \beta_p - 3n_p \cos^2 \beta_p) \\
 &= n_c t_c - t_p (n_c \cos \alpha - 3n_p \cos \beta_p) \\
 &= n_c(t_c - t_p \cos \alpha) + 3n_p t_p \cos \beta_p
 \end{aligned}$$

[0171] 对于用与腔相同的材料填充的潜望镜单元30(例如, 两者均用空气填充), 以下成立:

$$[0172] \quad n_p = n_c$$

$$[0173] \quad \beta_p = \alpha$$

[0174] 在这种情况下, 穿过可旋转潜望镜单元30的光学路径的表达式变为:

$$[0175] \quad \text{路径} = n_c(t_c - t_p \cos \alpha) + 3n_c t_p \cos \alpha$$

$$[0176] \quad = n_c(t_c + 2t_p \cos \alpha)$$

[0177] 因此, 有效腔长度 $L_c$ 通过以下表达式给出:

$$[0178] \quad L_c = t_c + 2t_p \cos \alpha$$

[0179] 当 $t_c \ll 2t_p \cos \alpha$ 时, 这进一步简化为:

$$[0180] \quad L_c \approx 2t_p \cos \alpha$$

[0181] 以上近似( $t_c \ll 2t_p \cos \alpha$ )在实践中易于实现, 尤其是通过充气的潜望镜单元30(或在潜望镜介质与腔介质相同的情况下); 下文将对此进行更详细地研究。

[0182] 通过安装到位的潜望镜单元30, 腔模同样由等于整数波长的腔的连续传递之间的光学路径差 $\Delta$ 来界定(与上文标准具和无潜望镜的腔模的界定类似):

$$[0183] \quad 2n_c L_c = m_c \frac{c}{v_c}$$

[0184] 当使用腔长度的近似表达式时, 给出以下:

$$[0185] \quad 2n_c(2t_p \cos \alpha) \approx m_c \frac{c}{v_c}$$

[0186] 这给出有关腔模频率 $\nu_c$ 的以下(近似)表达式:

$$[0187] \quad \nu_c \approx m_c \frac{c}{2n_c(2t_p \cos \alpha)}$$

[0188] 将经充气的潜望镜激光腔模的以上表达式与有关标准具模的先前表达式进行比较,可了解:

$$[0189] \quad \nu_c \propto \frac{1}{\cos \alpha} \text{ 而 } \nu_e \propto \frac{1}{\cos \beta_e}$$

[0190] 由于对于经充气的标准具10(或在标准具介质与腔介质相同的情况下)而言,内标准具角度 $\beta_e = \alpha$ ,因此可以使模调谐对旋转角度 $\alpha$ 具有大体上相同的相依性,并且可以实现跨明显调谐范围的单模(即,无跳模)激光操作。

[0191] 如果标准具10或潜望镜单元30含有具有不同折射率的材料(并且鉴于以上近似 $t_c \ll 2t_p \cos \alpha$ ),那么可了解,调谐匹配仅是近似,然而此类布置归因于经匹配的逆余弦相依性而仍然提供跨宽广范围的非常好的单模(即,无跳模)性能。

[0192] 潜望镜单元30中的镜面22、24的布置执行腔调谐布置的功能,其用于调节激光腔的有效光学路径长度以使腔模以频率移动,其中可通过腔调谐布置的旋转选择性地调节所选腔模的频率。

[0193] 此外,当腔模选择器(标准具10)和腔调谐布置(潜望镜单元30)通过彼此的共旋转来实行同时的经协调移动时,标准具模‘k’(选择特征)和腔模‘0’(所选腔模)的相应频率至少跨旋转角度的预定范围以对旋转角度的大体上相同的相依性而改变。通过此类布置,至少在其中抑制跳模的该预定范围上提供激光装置1的频率调谐。

[0194] 现将研究相较于如例如WO 2010/070272中所公开的仅旋转的标准具而使用共旋转的潜望镜布置的优势。另外,还将研究上述近似的有效性。

[0195] 可以通过与图8中示出的用于腔中潜望镜布置的腔模非常类似的方式来推导用于具有仅旋转的标准具(例如,或者由玻璃制成,或者在填充有另一介质的间隙的任一侧具有玻璃的厚度)的腔中标准具布置的腔模。

[0196] 使用玻璃板,图8的BD、DE和BF段在分析中不具有重要作用,仅AB和AC段相关。图9中示出玻璃板(代表标准具10)的光学路径,其中 $n_g$ 是玻璃的折射率且 $\beta_g$ 是玻璃内的内角。

[0197] 光学路径界定如下:

$$[0198] \quad \text{路径} = n_c(t_c - AC) + n_g(AB)$$

[0199] 根据先前分析,已经知道:

$$[0200] \quad AC = AB \left( \cos \alpha \cos \beta_g + \frac{n_g}{n_c} \sin^2 \beta_g \right)$$

$$[0201] \quad AB = \frac{t_g}{\cos \beta_g}$$

[0202] 因此:



$$\begin{aligned} \text{路径} &= n_c t_c - AB \left( n_c \left( \cos \alpha \cos \beta_g + \frac{n_g}{n_c} \sin^2 \beta_g \right) - n_g \right) \\ &= n_c t_c - \frac{t_g}{\cos \beta_g} (n_c \cos \alpha \cos \beta_g + n_g (1 - \cos^2 \beta_g)) \end{aligned}$$

[0203]

$$\begin{aligned} &= n_c t_c - t_g (n_c \cos \alpha - n_g \cos \beta_g) \\ &= n_c (t_c - t_g \cos \alpha) + n_g t_g \cos \beta_g \end{aligned}$$

[0204] 将所推导出的关于腔中潜望镜布置和腔中标准具布置的腔光学路径进行比较:

[0205] 潜望镜路径  $= n_c (t_c - t_p \cos \alpha) + 3n_p t_p \cos \beta_p$ [0206] 标准具(玻璃板)路径  $= n_c (t_c - t_g \cos \alpha) + n_g t_g \cos \beta_g$ 

[0207] 可见这些非常相似,不同之处在于最后项( $n t \cos \beta$ )的倍数。这两个光学路径对 $\alpha$ 和 $\beta$ 两者均具有相依性。然而,关键区别在于,使用潜望镜布置,可以通过使可旋转潜望镜单元30充气(或至少具有与腔相同的材料,即, $n_p = n_c$ )而使 $\alpha$ 和 $\beta$ 相等。如上文可见,左边的余弦项抵消右边的三个余弦项中的一个,从而潜望镜光学路径减小为:

[0208] 光学路径  $= n_c (t_c + 2t_p \cos \alpha)$ 

[0209] 如果对标准具10尝试相同的表达式,那么余弦项将彼此完全抵消,仅保留 $n_c t_c$ 项并且对旋转没有相依性(自然地,是因为玻璃已经由空气替代)。通过腔和标准具10的相异且不同的折射率,保留对 $\alpha$ 和 $\beta$ 两者的相依性,因此腔模频率对旋转角度不像对于潜望镜布置那样存在纯粹的逆余弦相依性。

[0210] 此外,如上所述,通过潜望镜布置,可以进行额外近似使得 $t_c \ll 2t_p \cos \alpha$ ,从而将光学路径减小为对 $\alpha$ 的几乎纯粹的余弦相依性:

[0211] 路径  $= n_c (t_c + 2t_p \cos \alpha)$ [0212] 并保留对腔模频率 $\nu_c$ 的几乎或大体上纯粹的逆余弦相依性:

$$[0213] \quad \nu_c \approx m_c \frac{c}{2n_c (2t_p \cos \alpha)}$$

[0214] 在实践中使用如图10A中所示的用于可旋转潜望镜单元30的布置可以易于实现此近似( $t_c \ll 2t_p \cos \alpha$ )。腔长度 $t_c$ 可以是任何值,例如零。其甚至可以是负值。通过设计设定腔长度 $t_c$ 以获得潜望镜单元30与标准具10的最佳调谐匹配。例如,如果标准具10是固体玻璃而潜望镜单元30是经充气的,那么正的腔长度 $t_c$ 可以获得最佳调谐范围。如果两者都是经充气的,那么原则上腔长度 $t_c = 0$ 是最佳的,但是在实践中典型的将是大约接近零。受到玻璃厚度(例如准直透镜、滤波器衬底和玻璃衬底)影响,最佳腔长度 $t_c$ 可以实际上略微为负。

[0215] 图10B示出了图10A的变化形式,在潜望镜单元30中具有四个镜面22a、22b、24a和24b而不是两个。可以通过例如回射器(例如,屋顶棱镜,猫眼反射器或角形反射器)等单个组件来提供右侧的一对相邻镜面22a、22b,并且类似地提供左侧的一对相邻镜面24a、24b。

[0216] 综上所述,可旋转潜望镜布置的关键优势是对标准具响应的匹配(或至少更接近的近似),因此对于较宽范围(在开始分解任何近似之前)腔模和标准具模以相同速率同步地沿着频率轴移位。 $t_c$ 接近零的经充气的标准具10和经充气的潜望镜单元30通常具有最佳性能(在实践中潜在地具有中心波长的百分之几的单模调谐范围)。即使使用固体标准具和正 $t_c$ ,调谐范围仍比W0 2010/070272的先前考虑的方案得到改进(例如大于中心波长

0.5%)。

[0217] 图11中示出了图6中示出的方案的一个实际布置。图11与图6中示出的图示的不同之处在于其示出了图1的光学增益介质2和准直透镜8,并且示出了被配置为使可旋转潜望镜单元30在由箭头31示出的方向上旋转的致动器40。致动器40将包含执行此类运动必需的所有电机和控制电子装置(未示出),且所属领域的技术人员将易于清楚其详细情况。例如,对于旋转运动,提供驱动轴的电机并非必不可少的,但是所属领域的技术人员将易于了解,此类运动可替代地通过结合适用的耦合件和枢轴的一个或多个线性驱动器来实现。

[0218] 在这方面中,还应指出,可旋转群组或单元30的平移对激光装置1的调谐没有影响,因此该方案受平移的影响较小。因此,无论使用任何机制来提供旋转移动,该方案都将对同时引起的任何平移移动不灵敏。这使得方案稳定,并且意味着不需要复杂的运动控制机制。

[0219] 然而,如果端面镜面28例如归因于机械偏移而倾斜,那么激光腔可能失去对准。为了克服这个问题并且提供改进的稳定性,期望用回射组件(例如,如图11中示意性地示出的猫眼反射器或角形反射器)替代端面镜面28。猫眼反射器包括折射光学元件和反射表面,其被布置以使得折射元件的焦面与反射表面(通常是透明的球体和球形镜面)相符。角形反射器包括一组三个相互垂直的反射表面,其被布置为如同形成立方体的边角一般。

[0220] 当然将了解到的是,标准具10和滤波器20可以布置在可旋转单元30内沿着光学路径的任一点处,且不必布置在图6、10和11中示出的位置处。标准具10和滤波器20可以各自单独地且独立地放置在沿着穿过可旋转单元30的光学路径的底部、中间和顶部支线中的任一个的任何位置处。标准具10和滤波器20甚至可以被布置为沿着光学路径的同一支线邻近彼此。实际上,在一些实施例中,标准具10和滤波器20的功能可以组合到单个组件中。

[0221] 取决于腔中使用的增益材料,可为有利的是略微偏移潜望镜几何形状以补偿材料色散从而使可用单模的操作范围最大化。作为引入几何误差的替代方案,可能同等地将补偿色散成分充分引入到腔中或调节操作参数(例如,二极管注入电流)以实现相同目的。

[0222] 参考图11中示出的布置,本申请人已经了解,端面反射器28处的激光束归因于潜望镜单元30的动作而进行的横向运动会使回射器方案难以实施到某些要求高的应用中所需的高精度。通过如图12中所示的修改后的方案可以克服此问题以提供改进的稳定性。

[0223] 图12的方案主要基于图11中示出的方案,关键区别在于激光束通过可旋转潜望镜单元30被传回,使用额外反射器29(其可以是回射组件)来实现这一点。额外反射器29构成上文参考图6描述的反射元件的第一布置的部分,并且现在实际上是激光腔的端面反射器(而不是反射器28)。在图12中,标准具10和滤波器20示出为单个元件,其中返回的光束不穿过标准具10和滤波器20(但是在另一实施例中,其可以穿过标准具10和滤波器20中的一个或两个,即使这不是所要的)。此类布置保持了所选腔模频率对旋转角度的逆余弦相依性,因此潜望镜布置的上述优势仍适用。

[0224] 可以由横向位移组件(例如屋顶棱镜、角形棱镜或透镜/反射器)替代反射器28以方便组件的放置,并且避免通过标准具10的入射角的光束截割和汇集。这在图13中示出,图13展现使用横向位移组件作为反射器28已经在组件10、20与虚线示出的光束之间形成更多间隙。

[0225] 虽然上文描述了使可旋转潜望镜单元30进行旋转,但是重要的是该单元30相对于

其它组件的旋转。因此,替代的可能是保持该单元30静止而使其它组件旋转,或使用组合来获得相对旋转。

[0226] 在以上描述的实施例中,标准具10执行腔模选择器的功能。然而,本发明不限于将标准具用作腔模选择器。更为概括性的,适用于本发明的腔模选择器将具有频率响应,该频率响应具有可与特定腔模以频率对准以激励该腔模优先于其它腔模发出激光的选择特征(例如标准具的模峰值)。例如,腔模选择器可以是衍射光栅。

[0227] 还将了解到的是,选择特征不需要对应于频率响应中的最大值的精确点,而是可以视为涵盖包括该最大值的频率的有限范围。因此,在标准具的情况下(其中选择特征是标准具模增益的峰值),选择特征不需要正好是最大值本身。实际上,“峰值”或“选择特征”可以在该最大值的任一侧延伸,例如,延伸到峰值高度的一半或峰值范围的一些其它合适的界定。在此上下文中的“峰值”可能是有限宽度的特征,并且将不必意指最大值的点。

[0228] 因此,当在本文中陈述选择特征与腔模频率对准时,选择特征的任何部分(不管如何定义)与腔模频率对准就足以。具体来说,在实践中无需选择特征的峰值的最大值与腔模的峰值精确地对准,即使这可能是获得最佳调谐性能优选的。唯一需要的就是当以频率而与所选腔模对准时,选择特征激励该腔模优先于其它腔模发出激光。

[0229] 此外,虽然以上实施例描述了组件的相对旋转以获得激光装置的调谐,但是可设想的是可以通过平移或甚至旋转和平移的组合来实现该调谐。一般来说,应可通过腔模选择器的预定移动来选择性地调节腔模选择器频率分布的选择特征的频率。

[0230] 类似地,上文描述的潜望镜布置仅是腔调谐布置的一个实例,其用于调节激光腔的有效光学路径长度以使腔模以频率移动,并且通过腔调谐布置的预定移动一般来说可以实现有效光学路径长度的调谐(以便选择性地调节所选腔模的频率),无论该预定移动是旋转或平移或旋转和平移的组合。

[0231] 一般情况下,致动器将被配置为使腔模选择器和腔调谐布置执行同时的经协调移动,其中选择特征和所选腔模的相应频率由于该同时的经协调移动而至少跨表征同步的经协调移动的参数的预定范围以对该参数大体上相同的相依性而改变。

[0232] 因此,组件不必以物理方式耦合以一起旋转,而是可以例如独立地旋转(但是是以经协调的方式独立地旋转)。例如,在选择特征和所选腔模的频率对旋转角度具有相同的相依性的假设下,可以使组件独立地旋转而在角旋转中具有精确相同的变化。在这种情况下,表征同时的经协调移动的参数仅是旋转角度。

[0233] 如果选择特征和所选腔模的频率对旋转不具有相同的相依性,那么该移动将被相应地协调。例如,频率可以对旋转角度具有相等但是相反的相依性,在此情况下可以使组件以相同速率进行逆向旋转。表征同时的经协调移动的参数可以是组件之一的旋转角度,因为其它组件的旋转角度简单地是该旋转角度的负值。

[0234] 替代地,一个组件可能具有逆 $\cos\theta$ 相依性,而另一组件可能具有逆 $\cos 2\theta$ 相依性,在此情况下,将使第二组件以第一组件速率的一半旋转。表征同时的经协调移动的参数可以界定为或被视为第一组件的旋转角度,因为另一组件的旋转角度简单地是该旋转角度的两倍:仅需要单个参数( $\theta$ )来表征这两个组件的同时的经协调移动。

[0235] 替代地,一个组件可能具有逆 $\cos\alpha$ 相依性,而另一组件可能具有逆 $\cos\beta$ 相依性,在此情况下,取决于 $\alpha$ 与 $\beta$ 之间的关系,将使第二组件以第一组件不同的速率旋转。表征同时的

经协调移动的参数可以界定为 $\alpha$ 或 $\beta$ 或某种组合或这两者的函数。

[0236] 关于滤波器20使用类似考虑。例如,虽然参考图5描述了具有单个宽峰的宽带滤波器(例如,多层滤波器),但是存在关于滤波器20的其它可能性。一般来说,滤波器应具有频率响应,该频率响应具有滤波器特征,该滤波器特征可与腔模选择器的与所选腔模对准的选择特征以频率对准,并且该频率响应与腔模选择器的频率响应组合以产生激励所选腔模优先于其它腔模发出激光的经组合频率响应。同样,滤波器特征通常将是有限宽度的特征。

[0237] 例如,替代方案将使用第二共旋转标准具作为滤波器20,其中该第二标准具的光学路径 $2n_eL_e$ 与模选择标准具10的略微不同,使得仅一对模峰值在激光材料增益带的宽度内重合,或至少使得任何额外重合峰值出现在经充分抑制从而不对发出激光模产生任何真实影响的材料增益处,这在图14中示出。通过此类方案,标准具10和滤波器20的功能有效地组合成单个组件,其中具有激励所选腔模优先于其它腔模发出激光的经组合频率响应。还将了解到的是,可以用此方式堆叠超过两个标准具以便微调经组合的标准具10和滤波器20组件的整体增益分布,从而例如获得更尖锐或更清晰的中心峰值或提供离心峰值的更佳抑制。

[0238] 另外,滤波器不必以物理方式耦合到其它组件而与它们一起移动。致动器将被配置为使滤波器元件、腔模选择器和腔调谐布置中的两个或更多个执行同时的经协调移动,其中经对准的选择特征、滤波器特征和所选腔模的相应频率至少跨表征同时的经协调移动的参数预定范围以对该参数大体上相同的相依性而改变。

[0239] 鉴于上文,在图15中更大体地(虽然示意性地)示出了本发明的实施例,其示出腔模选择器10、腔调谐布置30和滤波器元件20,它们可独立地移动但是通过致动器40执行同时的协调移动。致动器40被配置为控制腔模选择器10、腔调谐布置30和滤波器元件20以执行同时的经协调移动,其中腔模选择器10、腔调谐布置30和滤波器元件20的相应表征频率由于该同时的协调移动而至少跨表征同时的协调移动的参数预定范围以对该参数大体上相同的相依性而改变。

[0240] 应可理解到的是,在以下情况中仍将获得一些优点:在腔模选择器10、腔调谐布置30和滤波器元件20中的一个(而非两个)的经协调移动被固定的情况下,或在腔模选择器10、腔调谐布置30和滤波器元件20中的一个(而非两个)对表征同时的经协调移动的参数不具有相同相依性的情况下。这样做将(例如)意味着单模调谐范围将不如在所有三个组件具有相同相依性并在移动方面被协调的情况下一样宽广。因此,本发明旨在对图15中示出的组件10、20和30的两个或更多个的任何组合适用。

[0241] 通过独立控制每个组件10、20和30的移动,即使隐含的理论相依性是(例如)对旋转角度的逆余弦相依性,但是在其中那些组件中的一个或多个脱离该理论相依性(例如,其中近似性开始被打破)的情况下,致动器仍可被配置为相应地调节移动以便恢复所需同步。

[0242] 所属领域的技术人员将能理解镜面的“潜望镜布置”的词组含义,但是为了避免疑惑,该词组可以理解为意指多个镜面以光学方式串联布置的布置。以光学方式串联意味着串联中的每个镜面被布置为引导光朝向串联中的下一个镜面,如果有下一个镜面的话(串联中的最后一个镜面将引导光远离潜望镜布置,朝向上文描述的第一布置的镜面)。在此上下文中镜面可以理解为是至少部分地反射的表面或具有该表面,但是不旨在限制(例如,单个反射元件可以由任何数目的反射表面组成,无论是否连续,并且可以例如借助于光栅提

供反射功能)。因此可以使用更一般的术语“反射元件”代替“镜面”。潜望镜布置的镜面不必如图6到图8和图10到图12中所示的平行。然而,非平行布置会潜在地失去上文描述的腔光学路径对布置的平移不灵敏的优点:非平行排列的镜面的平移可影响腔光学路径。另外,可能存在超过两个如图6到图8和图10到图12中所示的镜面。

[0243] 图16中示意性地示出了此类替代潜望镜布置的选择。替代方案(A)具有构成可旋转潜望镜单元30的平行端面镜面和四个平行的潜望镜镜面。替代方案(B)具有构成可旋转潜望镜单元30的三个平行的潜望镜镜面,具有两个非平行的端面镜面。

[0244] 替代方案(C)具有用于构成可旋转潜望镜单元30的两个非平行的潜望镜镜面,其中具有两个非平行的端面镜面。替代方案(D)具有用于构成可旋转潜望镜单元30的三个非平行的潜望镜镜面,其中具有两个非平行的端面镜面。替代方案(E)具有两个潜望镜,并且在某种意义上类似于图12的“双通”(或“多通”)实施例,因为光束在返回到与增益介质2相关联的端面镜面(例如,左下方镜面)之前在每个方向上两次通过潜望镜单元30,尽管在相同的方向上的每次通过是经由不同潜望镜。使用替代方案(E)的两个潜望镜,一个增加光学路径,一个减少光学路径,因此假设这两个潜望镜具有不同 $t_p$ 值(或入射角),则将存在净逆余弦响应。然而,返回光学器件(理想地,回射器)上的光束仅在对称情况下完全稳定。应注意,仅具有平行的端面镜面(和偶数个潜望镜镜面)的替代方案(A)将展示腔光学路径对布置30的平移的不灵敏性。替代方案(F)示出了实际上为图12的“双通”(或“多通”)实施例的更直接的变化形式,其中在对应于图12的镜面22的上部虚线轮廓内具有两个镜面,在对应于图12的镜面24的下部虚线轮廓内具有两个镜面。其示出了可以考虑超过一个镜面或反射表面来构成潜望镜布置30的反射元件。

[0245] 在参考图16描述的每一个实例中以及先前示出的实施例中,频率可调谐激光装置包括反射元件的第一布置和反射元件的第二布置。第一布置的反射元件和第二布置的反射元件一起界定激光装置的激光腔。激光腔提供激光装置能够在其处发出激光的多个腔模,其中每个腔模具有不同的相应模频率。第二布置的反射元件提供腔调谐布置,用于调节激光腔的有效光学路径长度以使腔模以频率移动。腔调谐布置的反射元件以光学方式串联布置。可通过腔调谐布置的预定移动(例如,绕特定自由度的旋转)选择性地调节激光腔的有效光学路径长度。

[0246] 另外,对于“双通”(或“多通”)实例,第一布置的反射元件被布置为界定激光腔的光学路径,该光学路径在返回到第一布置的同一反射元件之前在每个方向上至少两次通过腔调谐布置的串联反射元件。例如,参考图12,在返回到第一布置的同一反射元件(即,光学增益介质2的背面6(见图1))之前,光学路径以第一方向或次序(22接着24)、接着以相反方向或次序(24接着22)、接着再次以第一方向或次序(22接着24)、且接着再次以相反方向或次序(24接着22)经过腔调谐布置30的反射元件22、24。可见光学增益介质2的背面6形成第一布置的反射元件中的一个。

[0247] 上文陈述了腔模选择器具有被配置以激励所选腔模优先于其它腔模发出激光的频率响应。应了解,在实践中,最终确定哪些腔模将发出激光的是与装置的任何其它元件的频率响应相组合的腔模选择器的频率响应。例如,可能的是腔模选择器具有本身并非必然引起单个主腔模的频率响应,但是它可以与具有频率响应的经固定的(非旋转或非移动的)光学组件相组合,其应对并提供单个主腔模的频率响应。这足以使腔模选择器起作用以激

励所选腔模优先于其它腔模发出激光(即,优先于至少一些而未必所有其它腔模)。换句话说,频率分布的选择特征并非必然绝对产生单个腔模,而是可以依赖于其它组件(包含激光介质的自然增益分布)来优化选择或提供更确定的主模。

[0248] 实际上,腔模选择器可以具有超过一个此类选择特征,这些选择特征可以在腔模选择器的频率响应中大体上同样突出:此类腔模选择器的实例是标准具10,上文阐述了使用此类腔模选择器时优选的是提供与标准具相组合的滤波器以产生所需响应。在先前考虑的布置中,滤波器为稳定的,但是在本文中提出滤波器可以与标准具共旋转以改进性能。

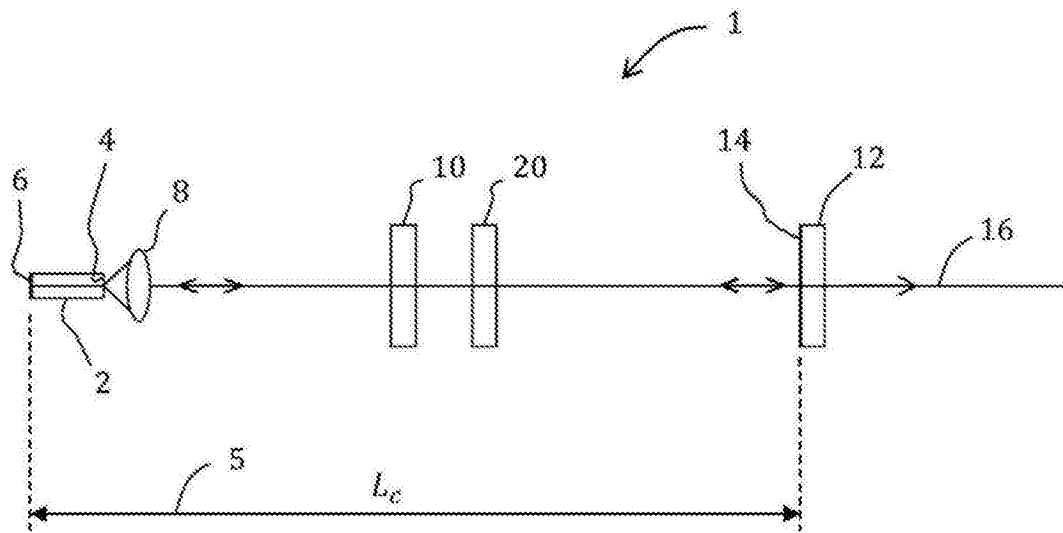


图1

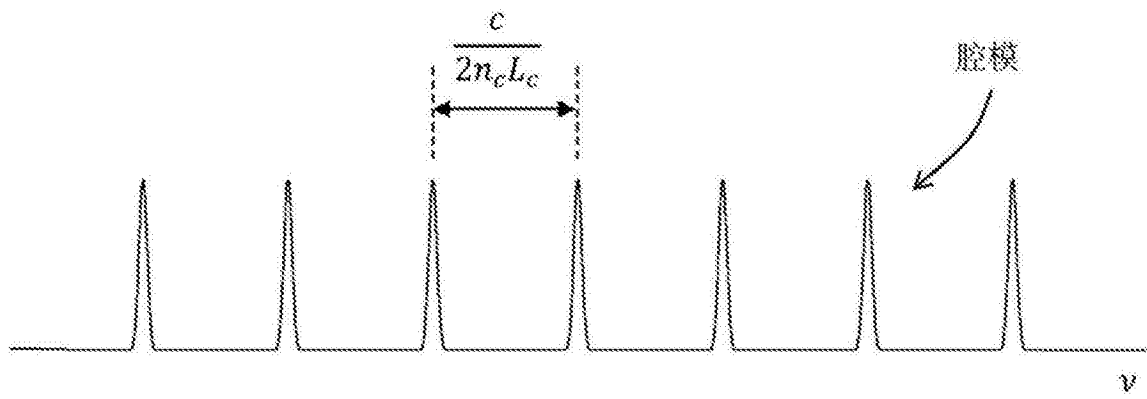


图2

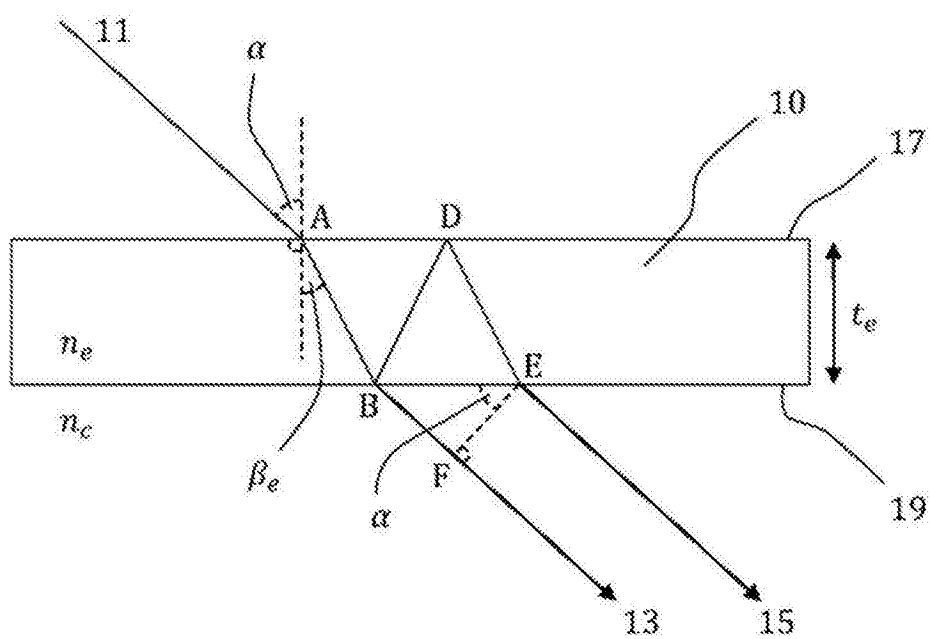


图3

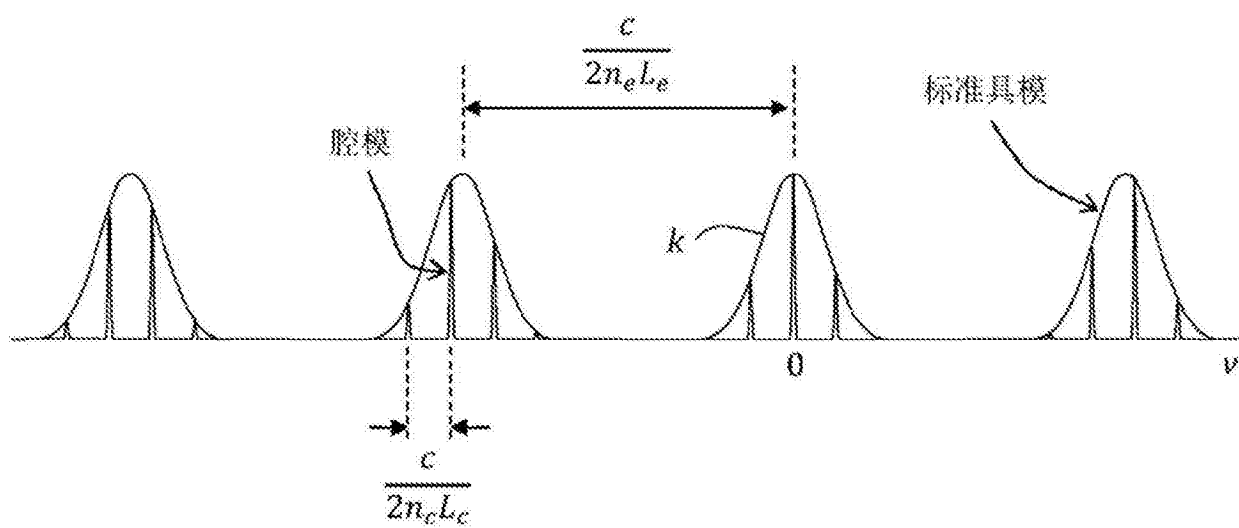


图4



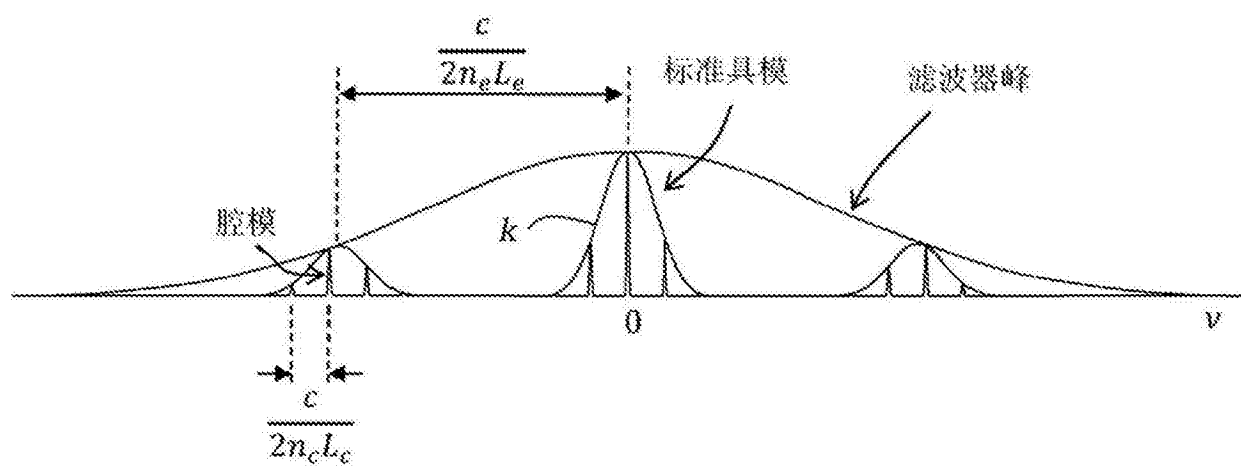


图5

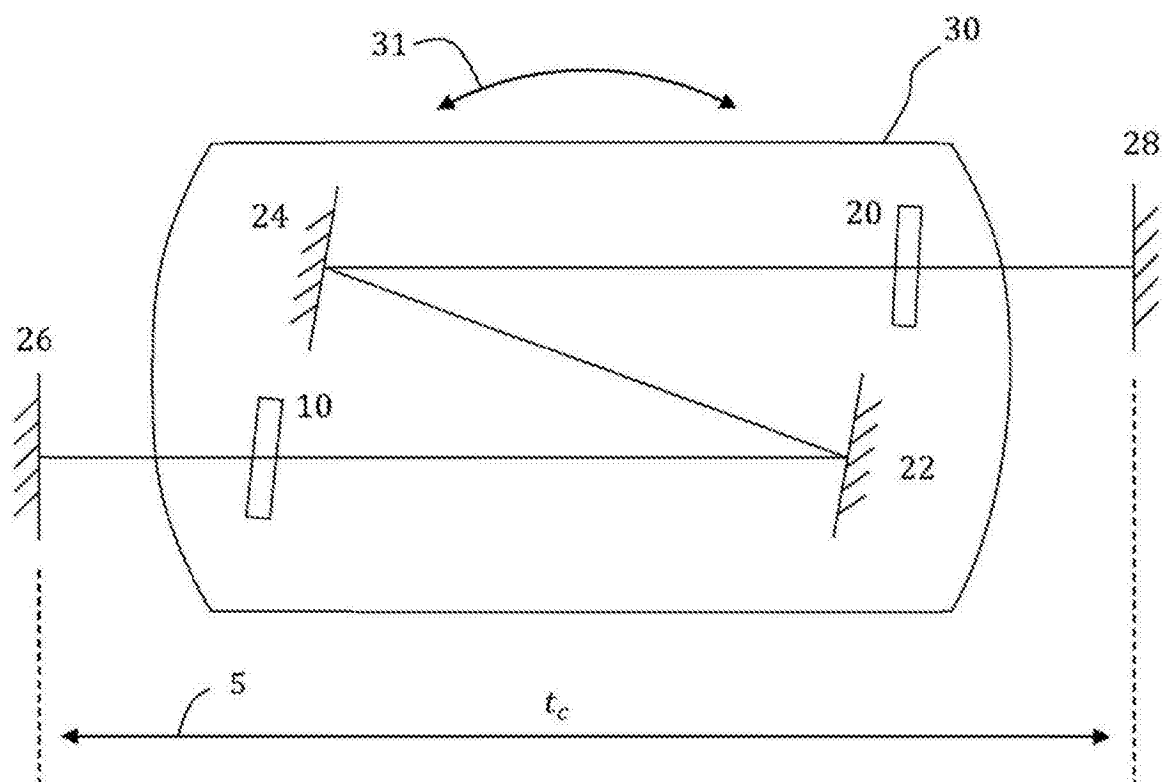


图6

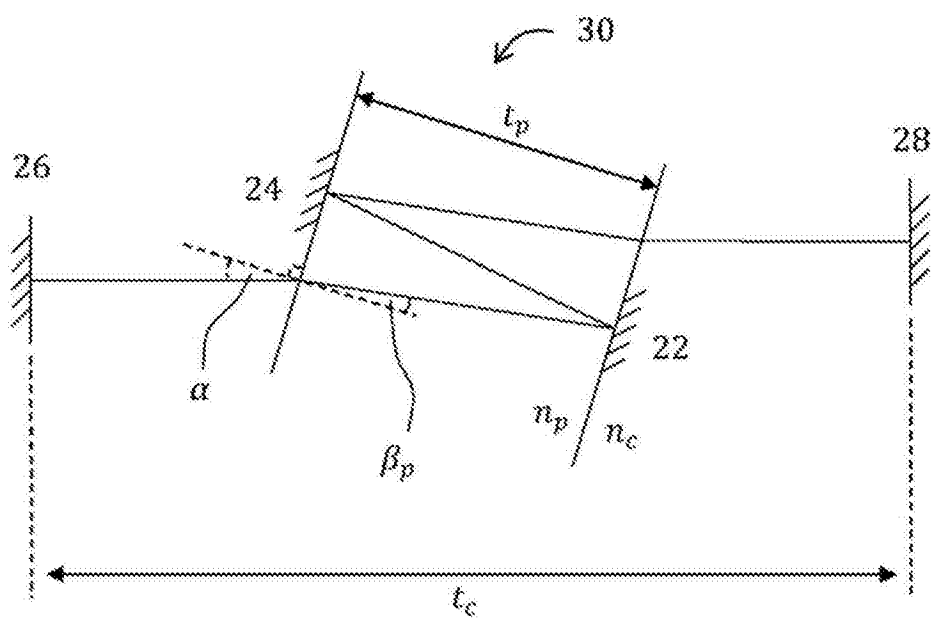


图7

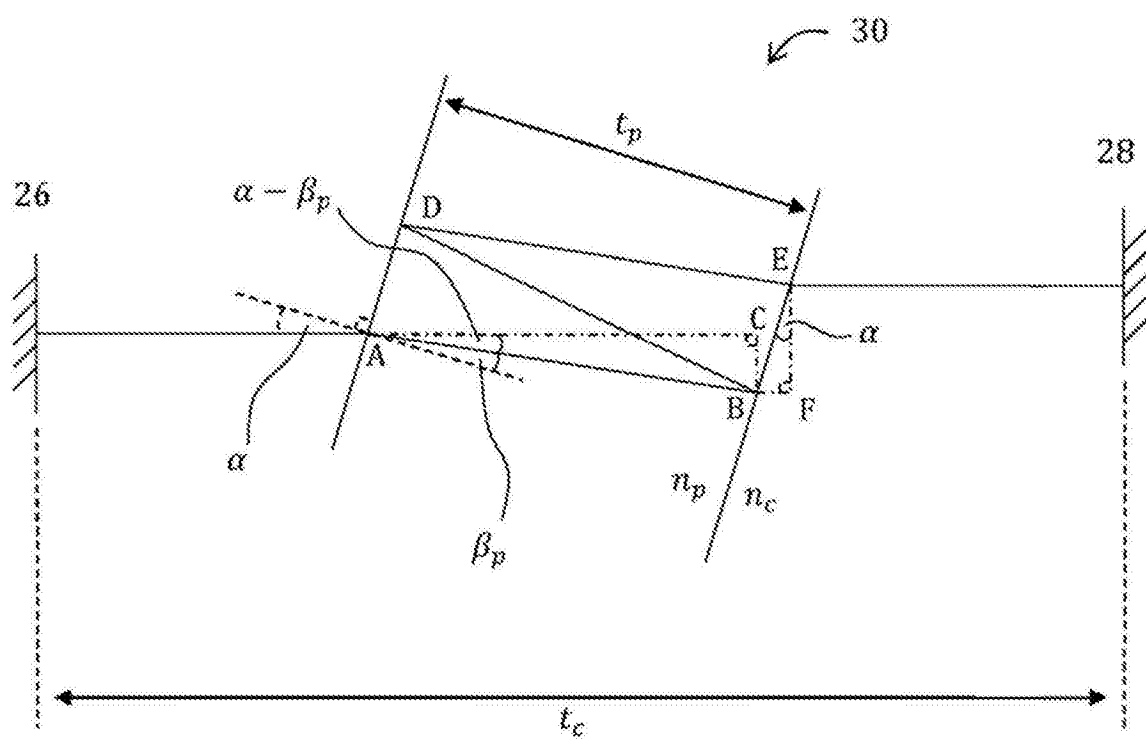


图8

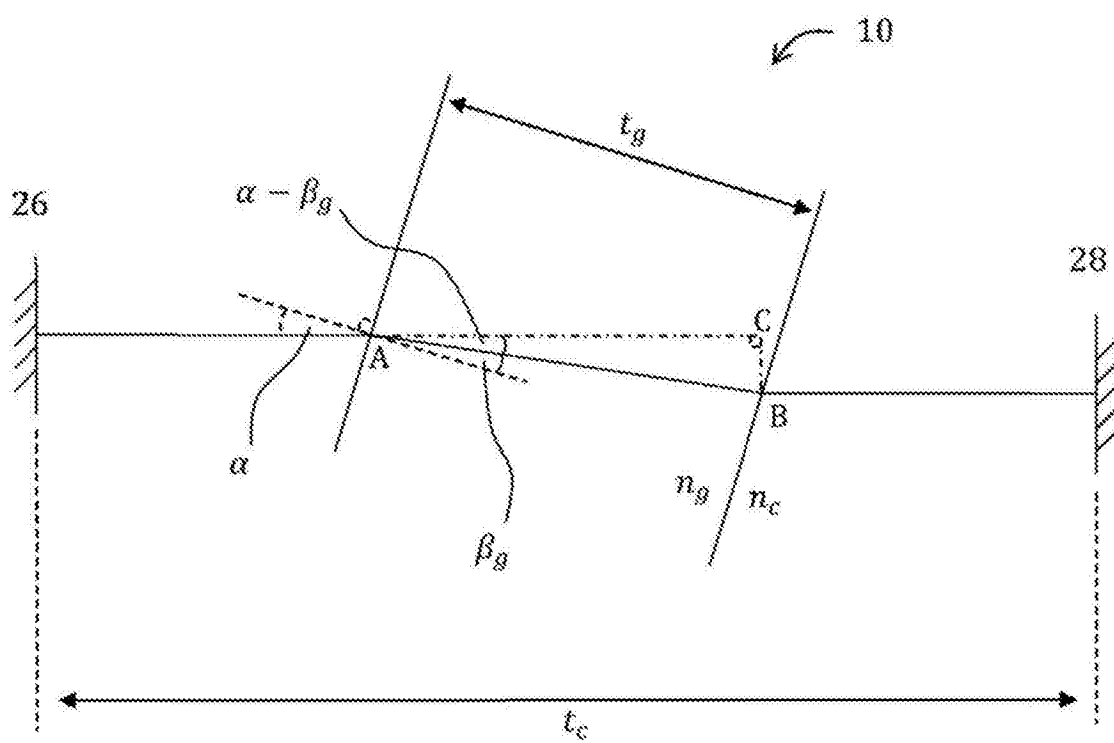


图9

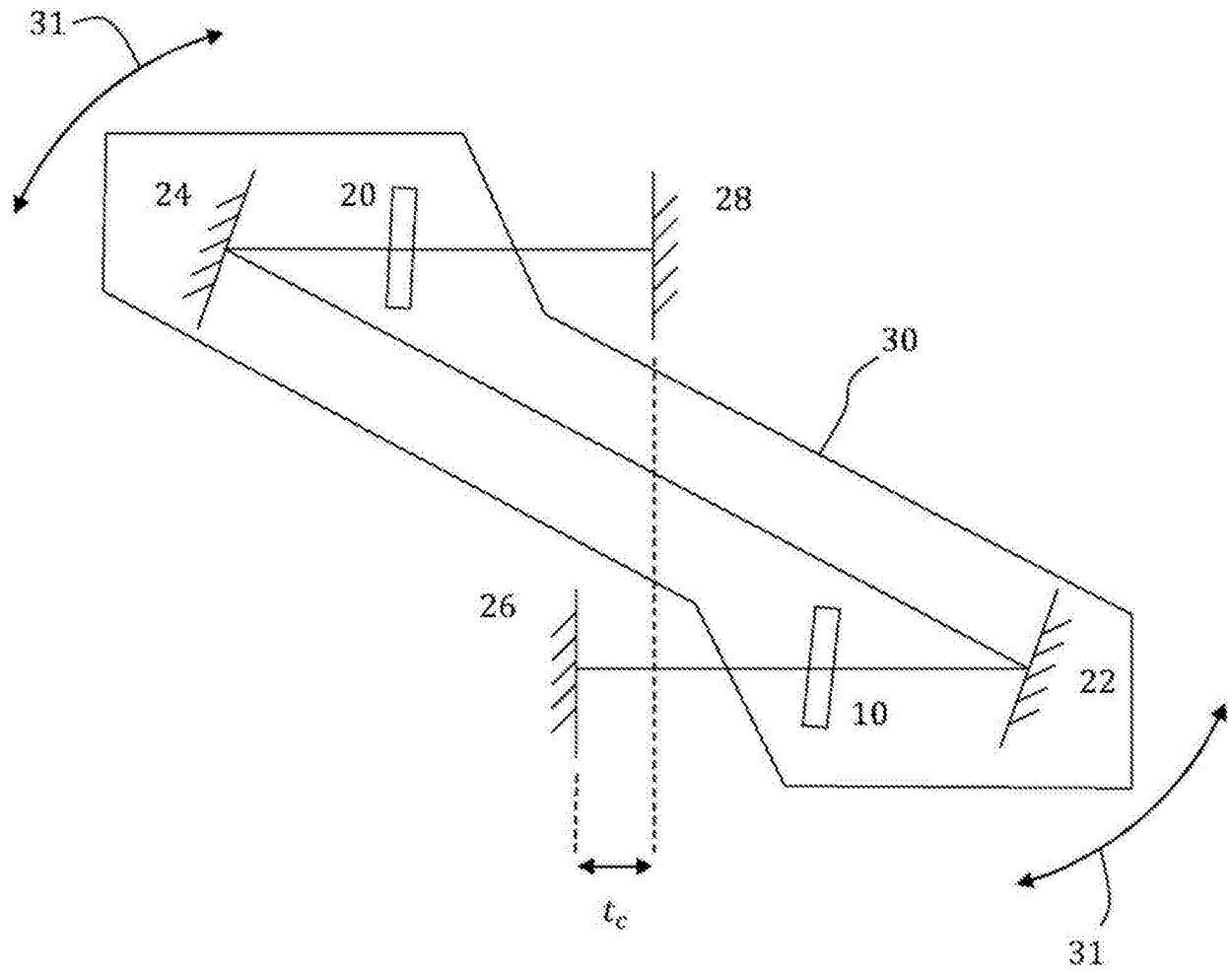


图10A

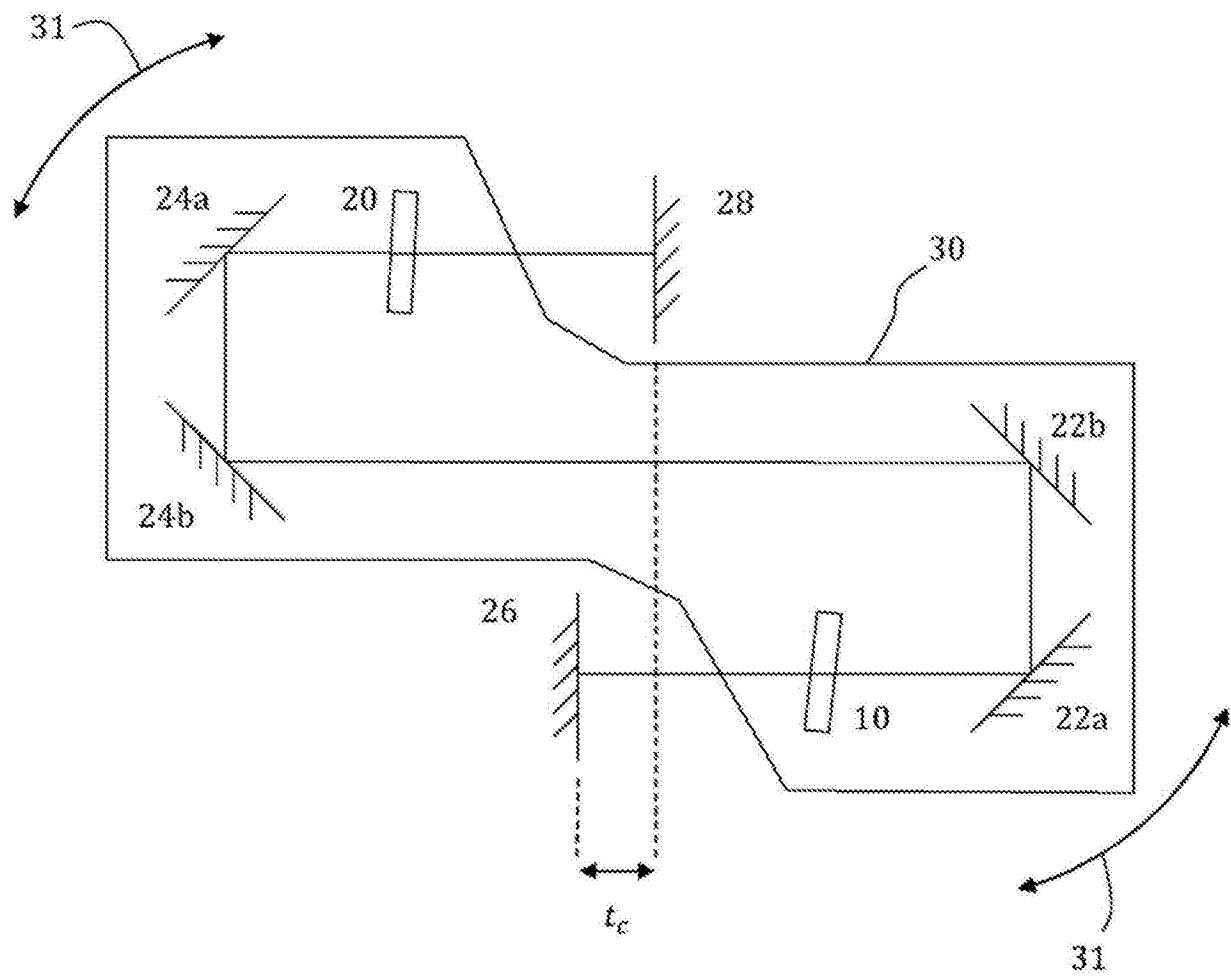


图10B

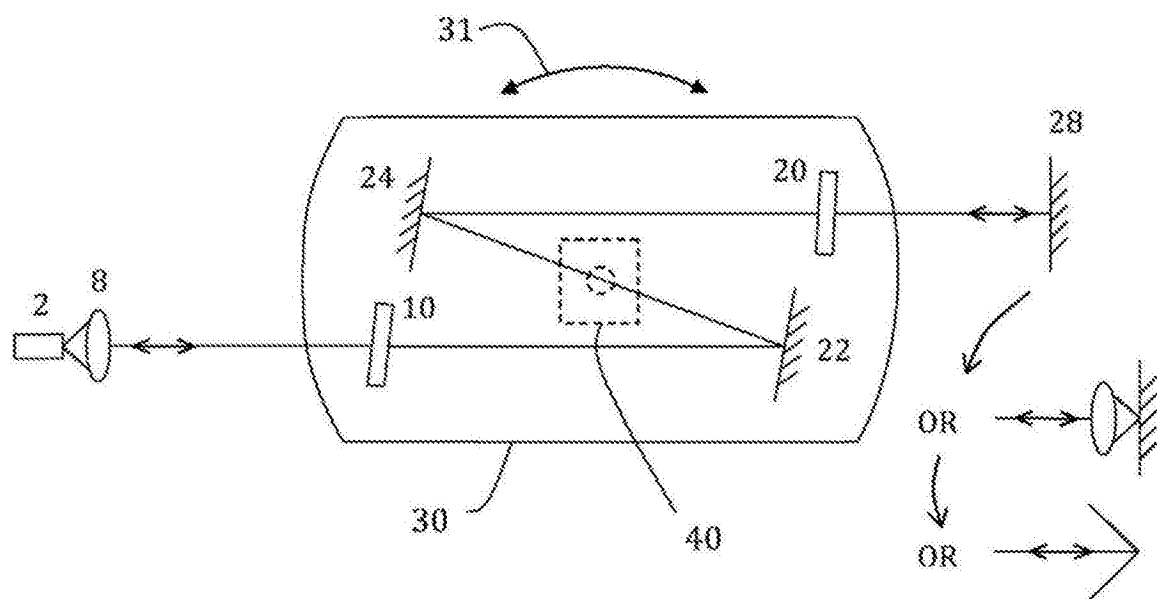


图11

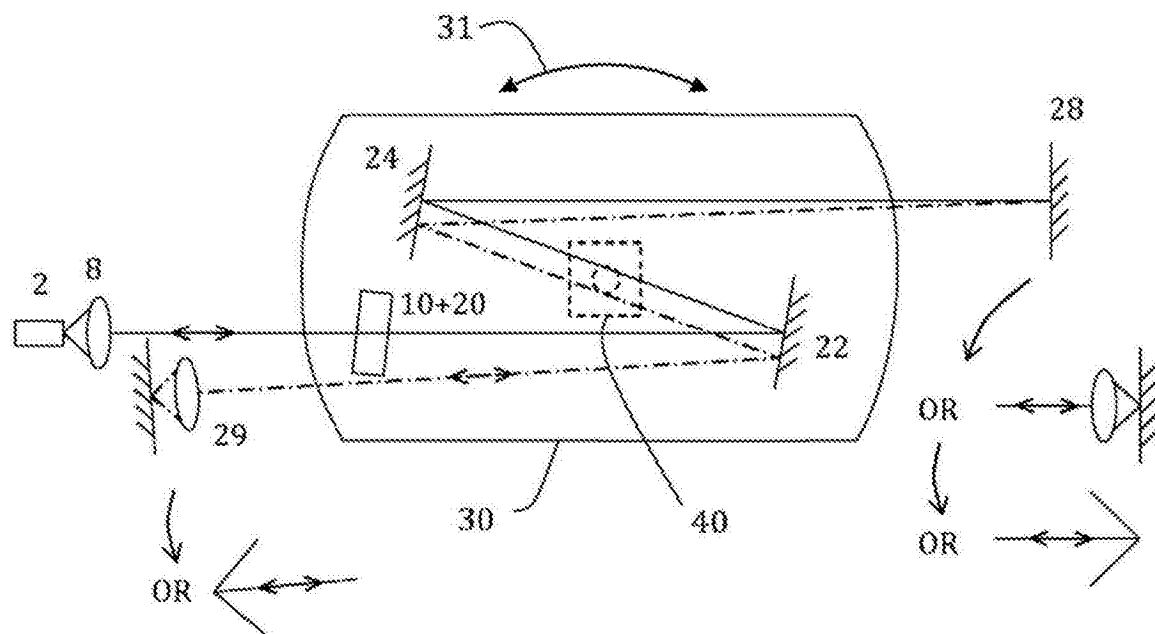


图12

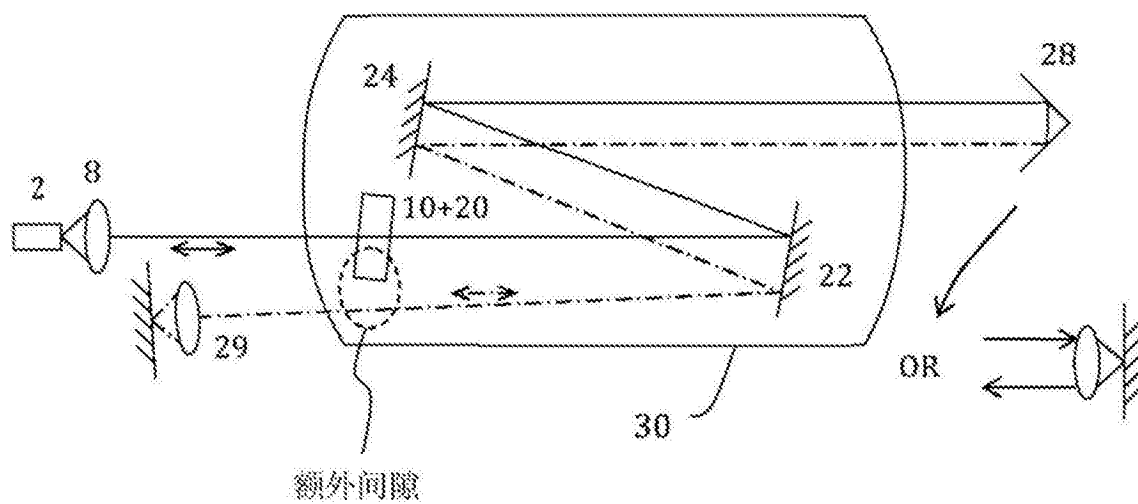


图13

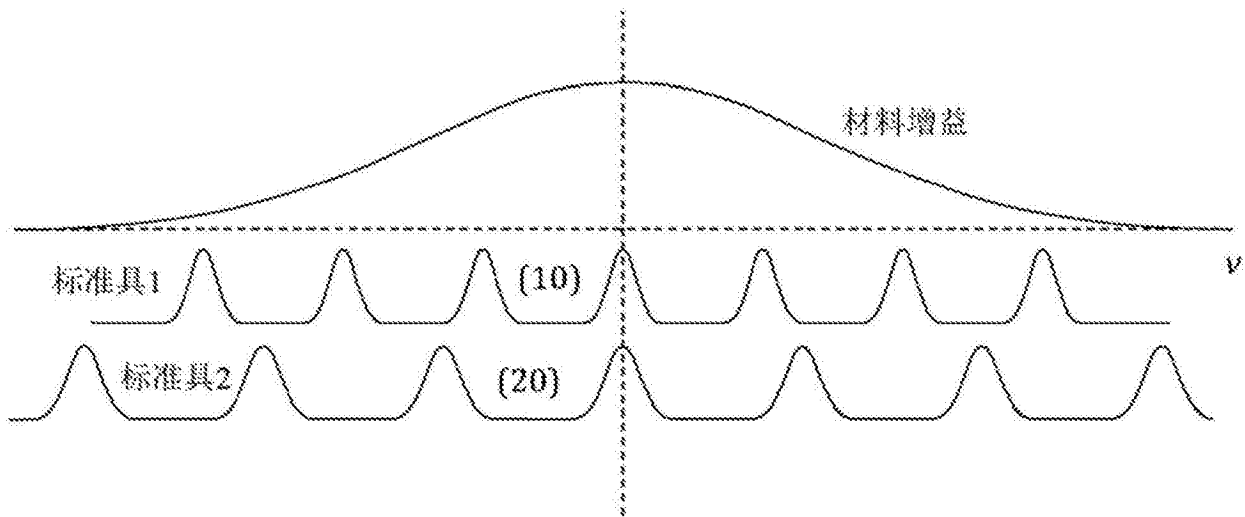


图14

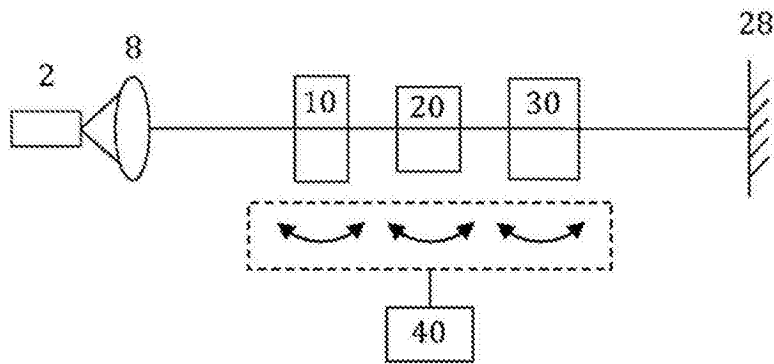


图15

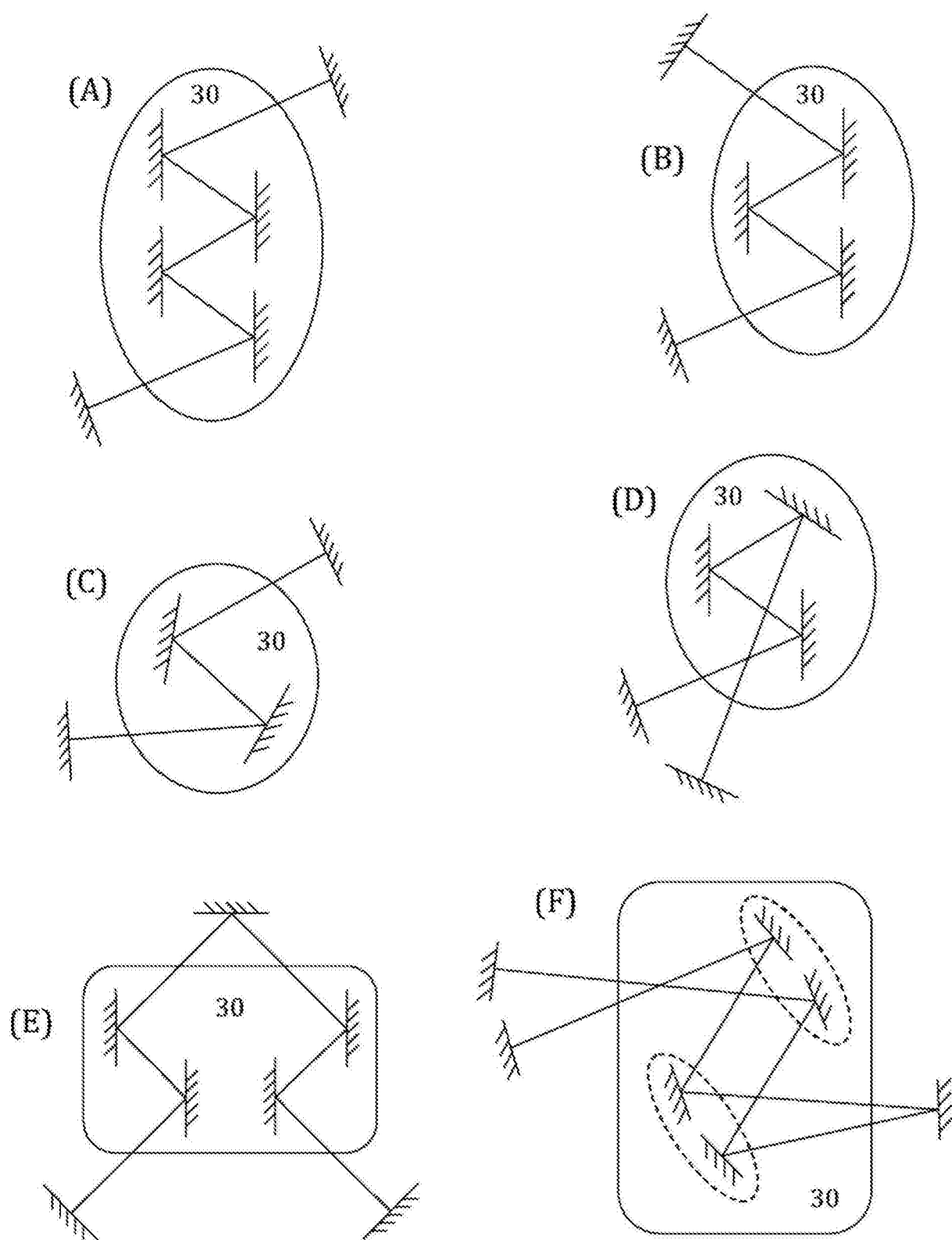


图16